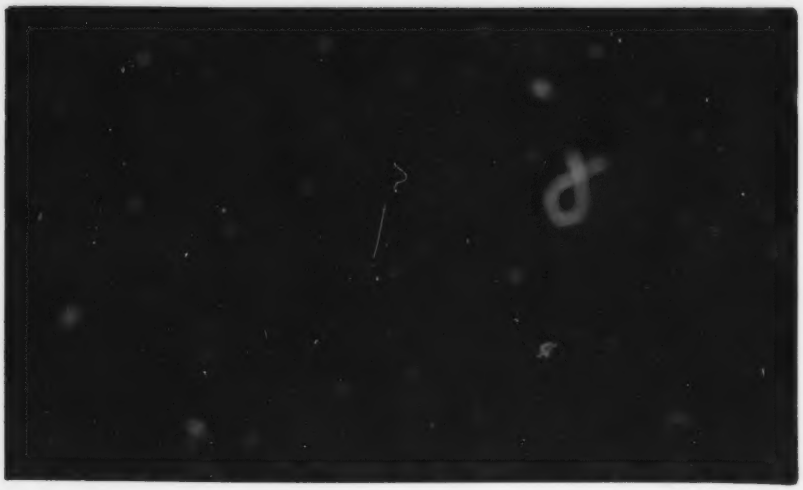
CENTRE
DE RECHERCHE
SUR LES TRANSPORTS
(CRT)
CENTRE
FOR RESEARCH
ON TRANSPORTATION

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES COMMERCIALES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE



C.P. 6128, SUCCURSALE A
MONTRÉAL (QUÉBEC)
CANADA
H3C 3J7

TÉLÉPHONE : (514) 343-7575
TÉLEX : 05-24146 BIBPOLYTEC
TÉLÉCOPIEUR (FAX) : (514) 343-7121

CRT-636

LE PROBLÈME DE L'ÉTABLISSEMENT DES ROUTES-HORAIRES DANS LE TRANSPORT ROUTIER DE CHARGES PARTIELLES

par

Teodor Gabriel Crainic*[1]
Louis Delorme[2]*
Jacques Roy[1]

* Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

[1] Département des Sciences administratives, Université du Québec à Montréal.

[2] Méthodes de gestion et d'analyse numérique des réseaux - Groupe TAI, Institut de recherche d'Hydro-Québec, C.P. 1000, Varennes, Québec JOL 2PO.

Université de Montréal
Centre de recherche sur les transports - Publication #636

Université du Québec à Montréal
Centre de recherche en gestion - Document de travail no 20-89

Juin 1989

90-01412/

Dépôt légal - 3e trimestre 1989

ABSTRACT

The load plan of a LTL motor carrier determines the services it operates and the frequencies it offers. To satisfy the stable part of the demand for transportation, regular driver routes have to be build. These routes have to cover the planned services and to abide by the laws, regulations and conventions that regulate the drive workload, while guaranteeing the timely delivery of goods at the destination terminal. The objective is to minimize costs and to insure an efficient fleet utilization. We examine the problem characteristics and propose a modeling and algorithmic approach, based on set covering ideas. Results of an actual application are also presented.

KEY WORDS: LTL Motor Carrier Transportation,
Routing and Crew Scheduling,
Set Covering.

RESUME

Le plan de transport d'une entreprise de camionnage de charges partielles détermine les services et fréquences à offrir. Pour assurer le service de base et répondre à la partie stable de la demande, il faut établir un ensemble de routes–horaires régulières qui couvrent les services et qui respectent les lois, règlements et conventions régissant le travail des chauffeurs, tout en assurant la livraison à temps des marchandises au terminus de destination. L'objectif est de minimiser les coûts d'opération et d'assurer une utilisation efficace de l'équipement. Nous examinons les caractéristiques du problème et présentons une approche de modélisation et de résolution basée sur des techniques de recouvrement d'ensembles. Les résultats des expérimentations effectuées à partir d'une application industrielle sont également présentés.

MOTS CLES: Transport routier de marchandises en charges partielles,
Etablissement de routes et horaires,
Modèles de recouvrement de réseaux.

I. INTRODUCTION

Dans les entreprises manufacturières, un problème important, et sans doute parmi les plus étudiés, est celui de la planification de la production, c'est-à-dire le choix des moyens à prendre (sous-traitance, variation du niveau des stocks, etc.) pour ajuster la production aux variations de la demande. Ainsi, il n'est pas rare qu'une entreprise manufacturière décide de produire à un rythme à peu près constant en faisant varier le niveau des stocks pour s'ajuster aux variations de demande. Le recours à ce genre de stratégie n'est toutefois pas réalisable pour les entreprises de service, tels les transporteurs, qui ne peuvent pas "stocker" leur production. Le problème de la gestion à court terme des opérations de ces entreprises est donc aggravé du fait que seuls des ajustements dans l'offre de service (par rapport au plan de transport) peuvent équilibrer les variations dans la demande. Or, ces variations peuvent être significatives, tant saisonnièrement que journellement. Les entreprises de camionnage de charges partielles (ou de lots brisés ou LTL - "less-than-truckload") doivent par conséquent s'ajuster à ces variations en:

(1) Etablissant des prévisions à moyen terme, annuelles et saisonnières, de la demande de transport;

(2) Elaborant, à partir des prévisions à moyen terme de la demande, un plan de transport (ou "load plan" - plan de chargement) saisonnier pour minimiser les coûts (transports et manutention des marchandises), tout en offrant un service rapide et fiable;

(3) Construisant un ensemble de routes–horaires régulières pour assurer les fréquences prévues dans le plan de transport qui correspondent à la partie stable de la demande (dans l'industrie, on appelle souvent ces routes–horaires "bids");

(4) Ajustant, lors de la répartition ("dispatching") des déplacements longue distance (ou intercité), le plan de transport et les heures de départ des routes–horaires régulières aux variations journalières de la demande.

Notre travail se situe au niveau de la troisième phase de la gestion des opérations de l'entreprise de camionnage de charges partielles.

Les entreprises de camionnage ont souvent recours à l'utilisation de routes–horaires régulières pour satisfaire la partie stable (représentant de 60% à 80% de la demande totale,

selon les saisons) de la demande de transport intercité des marchandises. Ces transporteurs peuvent ainsi assurer à leur principaux clients un service fiable, tout en offrant à leurs chauffeurs la possibilité de choisir, parmi un ensemble de routes régulières, celles qui leur conviennent le mieux. Ce choix s'effectue, dans la plupart des cas, selon l'ancienneté des chauffeurs dans l'entreprise. L'utilisation de routes–horaires régulières permet aussi de mieux contrôler et d'améliorer l'utilisation de l'équipement et facilite la répartition.

L'élaboration de telles routes–horaires suppose qu'on ait préalablement défini un plan de transport qui tient compte des compromis à respecter entre la satisfaction des niveaux de service offerts à la clientèle et la minimisation des coûts d'opération, et qui détermine:

- les types de service de transport prévus entre chaque paire de terminus et leurs fréquences;
- les itinéraires (suite de services et terminus de consolidation) qu'emprunteront les marchandises depuis leur origine jusqu'à leur destination finale;
- les mouvements de remorques vides pour rééquilibrer le réseau.

Des routes–horaires régulières sont ensuite conçues de façon à ''couvrir'' les services prévus au plan de transport, tout en respectant les règles établies dans la convention collective de travail des chauffeurs et les lois régissant leur temps de travail. L'objectif est, dans ce cas, d'assurer la livraison à temps des marchandises au terminus de destination et de minimiser les coûts d'opération et le nombre de déplacements de remorques vides et de tracteurs sans remorque (les ''nus'').

La difficulté, néanmoins, consiste à élaborer des routes régulières efficaces. En effet, les coûts associés à différents ensembles de routes régulières varient en fonction:

(i) du degré d'utilisation des heures productives permises par les lois et la convention collective;
(ii) de la fréquence des temps d'arrêt pour changer de remorque, faire le plein et autres temps d'attente;
(iii) de l'utilisation du surtemps;
(iv) des frais auxiliaires tels que les frais d'hébergement, de repas, etc.

Devant l'ampleur du problème, les gestionnaires des entreprises de camionnage, qui doivent résoudre ces problèmes manuellement, se contentent généralement d'analyser un

nombre restreint de combinaisons de routes possibles (souvent en modifiant l'ensemble de routes utilisé lors de la période précédente de planification), se fiant à leur expérience pour obtenir un ensemble efficient de routes régulières. Or, cette approche s'avère insuffisante dans un contexte d'évolution rapide de l'industrie et, surtout, dans le cadre de la réglementation plus stricte, actuellement en vigueur, concernant la durée des périodes de conduite et de repos.

Notre approche vise justement à proposer un système informatique d'aide à la prise de décision en vue d'améliorer l'efficacité du processus de planification et la qualité des routes–horaires régulières utilisées par les entreprises de transport routier des marchandises. Le but de ce rapport est de présenter la démarche que nous proposons, de décrire la méthodologie utilisée pour la génération et la sélection des routes–horaires régulières, d'esquisser les principes de l'outil informatique intégrant cette méthodologie, ainsi que de discuter les implications et perspectives futures de cette approche.

Le plan du rapport est le suivant. La deuxième section présente la démarche générale que nous proposons et rappelle les éléments principaux de la planification tactique, tandis que la troisième définit les notions fondamentales du problème de la génération et de la sélection du meilleur ensemble de routes–horaires régulières dans le camionnage de charges partielles. La section IV traite du problème de génération des segments, tandis que la cinquième est dédiée à la description de la méthode de génération des routes–horaires. La section VI traite du choix optimal des routes–horaires et la section VII présente les résultats des expérimentations effectuées à partir d'une application industrielle. Dans les annexes, nous examinons une formulation alternative du problème et considérons brièvement le cas de l'agencement des routes–horaires en plans de travail. Nous concluons par une discussion des implications pratiques et théoriques de nos travaux et une évaluation de leurs suites probables.

II. DEMARCHE PROPOSEE

La démarche que nous proposons pour l'établissement de routes-horaires régulières suit l'approche générale présentée à la section précédente et est illustrée à la figure 1. Il faut toutefois noter que, pour des raisons de clarté, nous n'avons pas inclus dans ce diagramme, ni les boucles indiquant les itérations successives, ni les interrelations entre décisions d'un même niveau, ni les actions de "feedback" entre les décisions de niveaux différents qui sont propres à tout processus de planification.

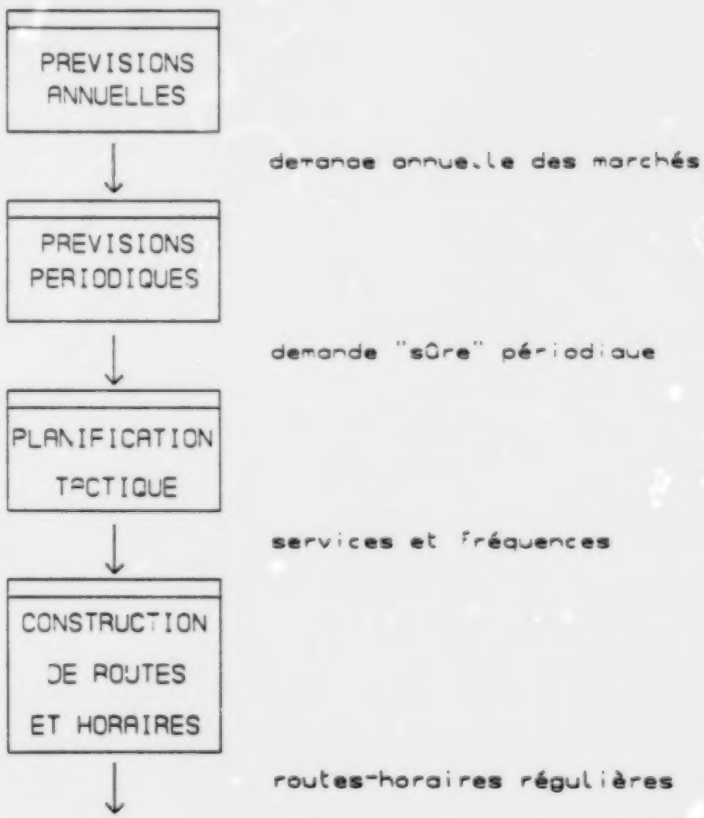


Figure 1. Démarche de planification

Il faut tout d'abord établir des prévisions de la demande de transport pour la période de planification concernée et en estimer la partie "stable". En effet, des routes régulières ne sont profitables que lorsqu'un certain volume de demande peut être connu à l'avance avec un très haut niveau de confiance. Dans les entreprises de camionnage de lots brisés, dont la taille à l'échelle cannadienne est importante, cette partie "sûre" de la demande peut représenter de

60% à 80% de la demande totale, selon les saisons.

La demande est prévue pour chaque marché desservi par l'entreprise de transport. Un *marché* est défini par une paire de villes origine – destination. En général, une entreprise de camionnage de lots brisés opère un réseau de terminus, établis normalement chacun dans, ou près, d'une agglomération, à partir desquels les clients sont servis. Ces terminus ont des tailles variées et peuvent jouer des rôles bien différents; mentionnons les terminus de classification/consolidation (''breakbulk'') et ceux de fin-de-ligne (''end-of-line'') où on ne traite, en général, que le trafic local provenant ou allant vers le terminus de consolidation désigné.

Ces nuances, importantes pour l'établissement du plan de transport, sont moins pertinentes dans le cas qui nous intéresse. Nous faisons donc l'abstraction de confondre ville et terminus et de ne pas distinguer les divers types de terminus. Nous dirons donc que la demande d'un marché s'exprime par la quantité de marchandises à transporter d'un terminus d'origine à un terminus de destination, pour la période de temps donnée.

Ces prévisions de volumes pour chaque marché serviront ensuite d'éléments de base au processus de *planification tactique* (Crainic et Roy, 1988), visant à élaborer un *plan de transport* ou *plan de chargement (''load plan'')* pour la partie stable de la demande. Un tel plan de transport peut être établi en utilisant le logiciel NETPLAN (Roy et Delorme, 1989), qui fut développé à partir du modèle de planification tactique de Roy (1984) et de la méthodologie proposée par Crainic (1982, 1989) et Crainic et Rousseau (1985).

On retrouve dans ces formulations deux notions importantes, soit celles de service et d'itinéraire.

Un *service* définit un mode de transport offert entre un terminus d'origine et un terminus de destination. Un service est également caractérisé par la route (ou parcours) qu'il emprunte de son origine à sa destination. Cette dernière caractéristique est toutefois peu pertinente, donc négligée, au niveau tactique. Elle prend cependant une place importante dans la définition et la génération des routes–horaires, comme nous le verrons dans les sections suivantes. La *fréquence* est une autre caractéristique importante d'un service; elle correspond au niveau de ce service (nombre de départs) pour la période de planification choisie. L'ensemble de tous les services offerts par une entreprise de camionnage définit son *réseau de service*.

Un *itinéraire* spécifie une façon de transporter du fret de son origine (un terminus du réseau du transporteur) jusqu'à sa destination (un autre terminus du même réseau), en utilisant les services et terminus du réseau de l'entreprise. Donc, un itinéraire est défini comme la suite des services empruntés pour transporter la marchandise d'un marché donné, de son terminus origine à son terminus de destination, ainsi que la spécification des opérations de manutention effectuées aux terminus intermédiaires. Quoiqu'occupant une place de premier plan lors de la construction ou de l'évaluation d'un plan de transport, les itinéraires n'interviennent pas directement lors de la résolution du problème des routes–horaires régulières.

Le plan de chargement établi lors de la planification tactique guide et fournit des éléments à plusieurs processus de planification et d'opération: planification et gestion des activités dans les terminus, répartition des véhicules et des équipages, établissement des itinéraires particuliers ou alternatifs (en cas de variations excessives de la demande ou lors de demandes non prévues), etc. C'est aussi le cas pour le problème de l'établissement des routes–horaires régulières qui se base sur la partie des fréquences de service qui correspond à la partie régulière de la demande, plus les retours à vide prévus pour rééquilibrer le réseau.

Nous n'avons trouvé dans la littérature de spécialité aucune référence mentionnant des travaux portant sur ce sujet. Toutefois, l'analyse des caractéristiques du problème et les comparaisons avec les problèmes d'établissement des horaires d'équipage pour les autres modes de transport (Rousseau, 1984), nous ont amené à conclure que le cas de la construction de routes–horaires régulières présente des similitudes importantes avec celui concernant les horaires des équipages d'avions (Crainic et Rousseau, 1987).

Nous proposons donc une approche qui, à partir des services et fréquences spécifiés dans le plan de transport et des règles et conventions de légalité (lois, convention collective, etc.), traite le problème à travers trois modules:

(i) génération d'un ensemble de "bonnes" routes;

(ii) sélection de l'ensemble "optimal" de routes couvrant tous les services considérés;

(iii) affectation des horaires.

La représentation schématique de cette approche est présentée à la figure 2.

Dans les sections qui suivent nous présentons les étapes nécessaires à la résolution de chacun des sous-problèmes identifiés dans le diagramme, ainsi que les détails

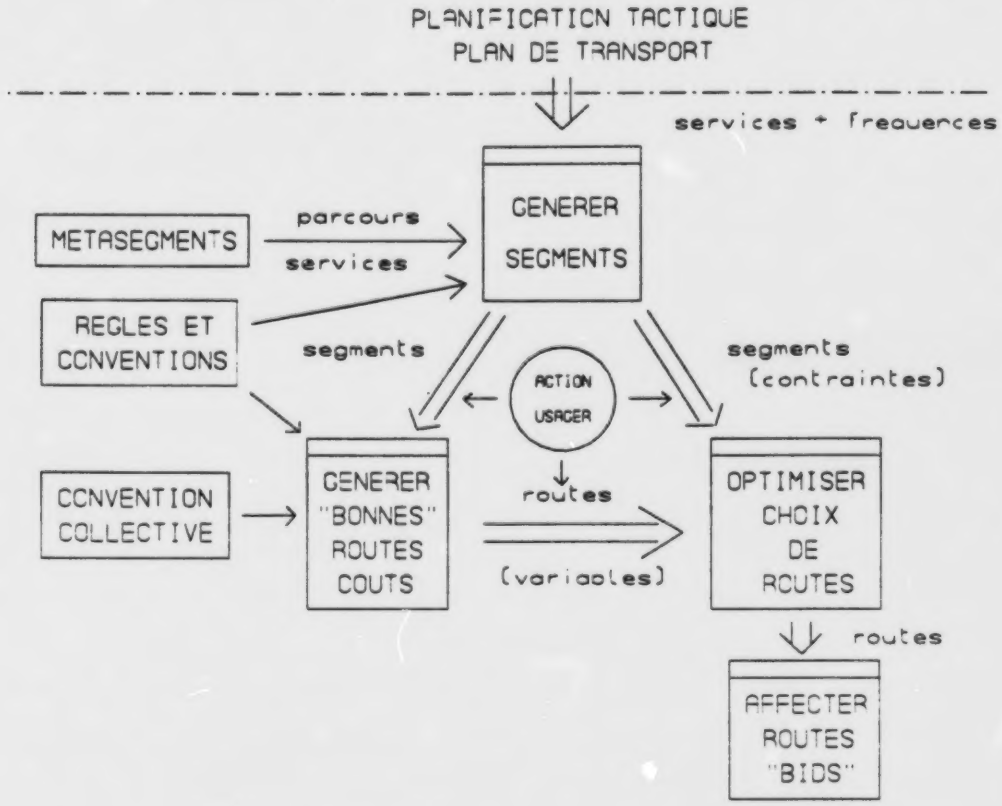


Figure 2. Schéma de la méthode

méthodologiques.

Il est important de noter que nous avons prévu la possibilité de l'interaction de l'usager avec chacun des modules composant le système, ceci à la fois pour diriger les processus, pour faciliter les choix finaux et pour permettre à l'usager d'imposer ses critères et ses préférences. Cet aspect de l'approche est très important, étant donné le grand nombre de routes possibles et de règles, critères et règlements qui ne peuvent pas tous être incorporés dans un modèle quantitatif. Cette interaction sera assurée par la mise au point de systèmes interactifs-graphiques incorporant les modèles et procédures dévéloppés. La description détaillée des caractéristiques et principes de fonctionnement de ces systèmes dépasse cependant le cadre de ce rapport.

III. DEFINITIONS

Les composantes fondamentales de notre problème s'articulent autour des notions de *parcours* de service, *segment* et *route–horaire* pour les chauffeurs. Ces éléments possèdent tant des attributs descriptifs, tels que localisation, durée, etc., qu'une dimension temporelle indiquant le moment de l'accomplissement dans le temps du déplacement correspondant. Nous appelons cet instant, *temps du départ*.

Il est à remarquer qu'un élément ne possède qu'une seule description physique, mais qu'en général il a plusieurs occurrences temporelles, tel un trajet entre deux villes données qui est parcouru à plusieurs reprises pendant la période de planification. Pour distinguer ces deux aspects, descriptif et temporel, nous faisons donc précéder le nom de l'élément du préfixe *méta* lorsque le deuxième aspect n'est pas pertinent.

Définissons la *période de planification* (ou, plus brièvement, *période*) comme la période de temps, habituellement une semaine, pour laquelle les routes–horaires doivent être spécifiées. Cet horaire sera ensuite répété pour les périodes subséquentes. Les temps de départ de toutes les composantes du problème seront indiqués par rapport à l'heure zéro du début de la période de planification.

Une période se décompose normalement en plusieurs jours, chaque *jour* correspondant à un cycle de travail et temps libre (incluant le repos). Il faut noter que pour le camionnage interurbain de lots brisés, un jour ne correspond pas directement à une journée du calendrier: la période de travail du chauffeur commence dans la soirée et se termine le lendemain matin. Il faudrait donc parler plutôt de nuit de travail. Pour des raisons de clarté, nous utilisons cependant les notions plus traditionnelles de *journée (période) de travail* et *période de repos*.

Nous décrivons la structure et les opérations de l'entreprise de camionnage de lots brisés en termes de divers *réseaux*. Ces réseaux sont tous définis par le même ensemble de noeuds, leurs liens pouvant cependant varier.

Un *noeud* représente un point géographique où une opération peut être effectuée. Un noeud peut ainsi être soit un *terminus*, soit un *point de relève*. A un point de relève, un chauffeur peut changer de remorque mais aucun service ne peut y débuter ou finir. Une *base* est un terminus (ou plutôt la ville où ce dernier est situé) où des chauffeurs sont stationnés.

La figure 3 illustre ces définitions. Les noeuds 1, 2 et 3 représentent des terminus qui sont aussi des bases, tandis que le noeud 4 indique un point de relève.

Appelons B l'ensemble des bases, T l'ensemble des terminus et N l'ensemble des noeuds, avec $B \subseteq T \subseteq N$. Définissons d_j^n comme la *durée moyenne de l'opération* au noeud j, $j \in N$. Cette durée varie évidemment selon le type de noeud.

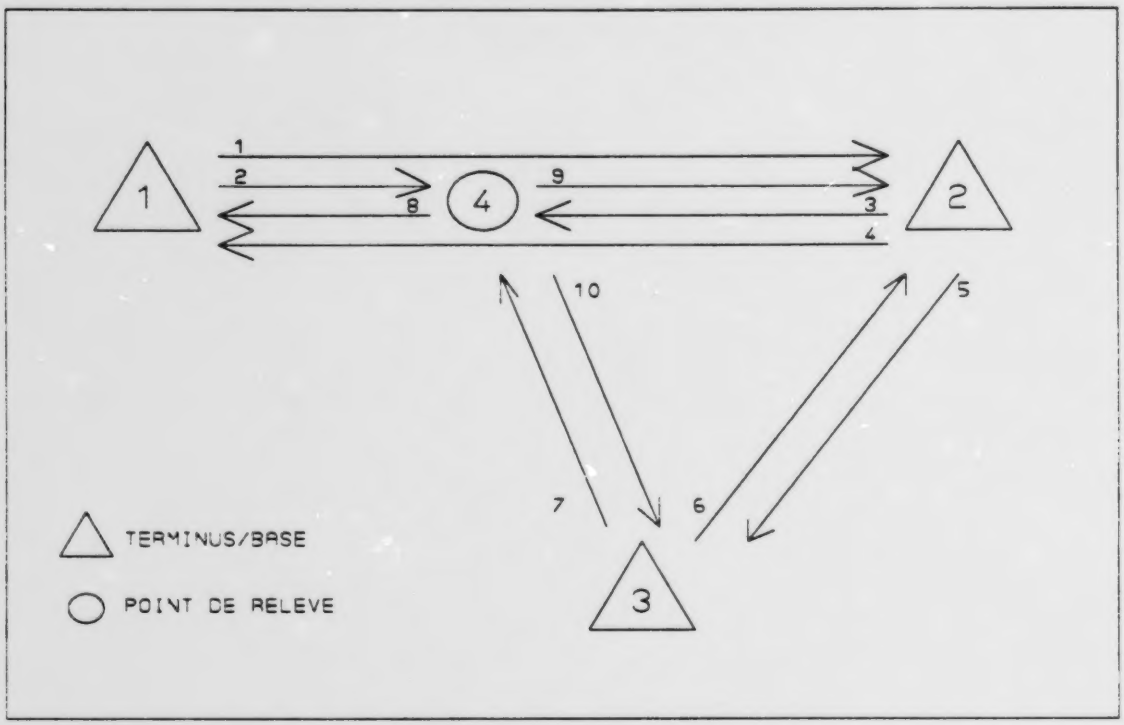


Figure 3. Ensemble de noeuds et réseau des métasegments

Un *métasegment* représente une liaison entre deux noeuds du réseau qui, d'après les règles et politiques de la compagnie, peut être effectuée sans opération intermédiaire. Soit Σ l'ensemble de tous les métasegments. Pour un métasegment s, $s \in \Sigma$, définissons:

- *Origine* O_s, $O_s \in N$;
- *Destination* D_s, $D_s \in N$;
- *Durée moyenne de parcours* d_s^p;
- *Fréquence* f_s^p : le nombre de fois que le métasegment est utilisé par les services spécifiés par le plan de transport courant, pendant la période de planification.

Les métasegments définissent un réseau, $G_\Sigma = (N, \Sigma)$, représentant les déplacements permis par les règles et politiques de la compagnie. Les divers *parcours* possibles des services sont également définis à partir de ce réseau.

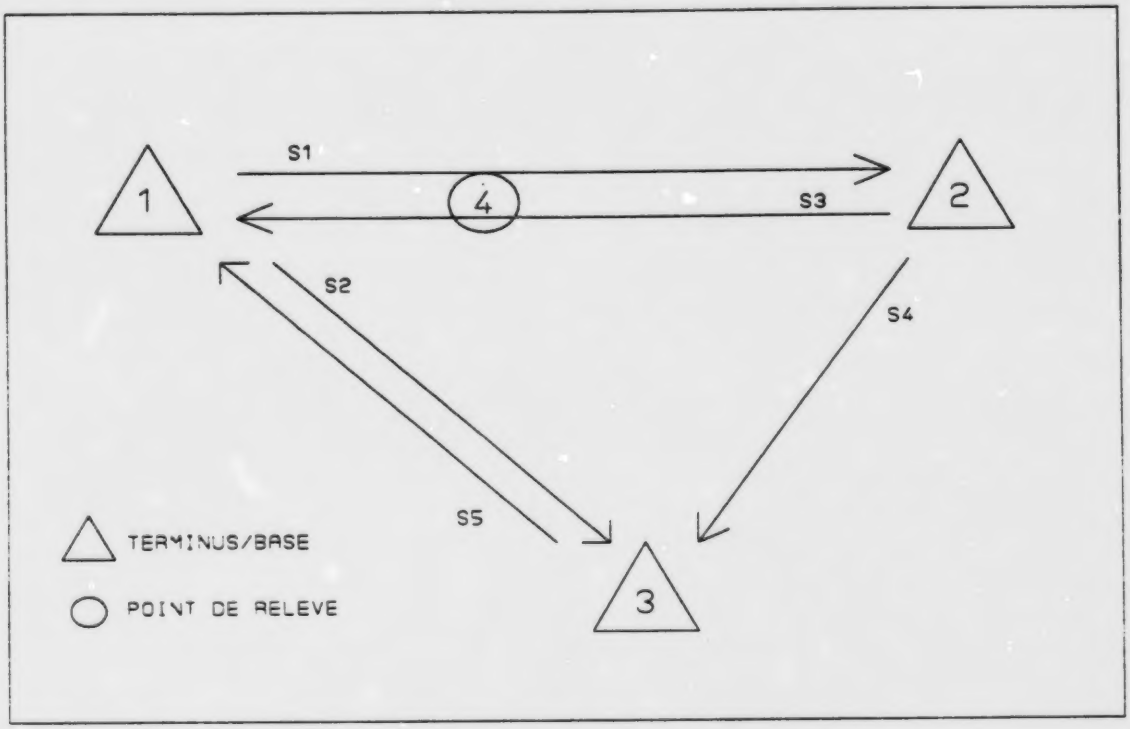


Figure 4. Réseau des services

Ainsi dans le réseau illustré à la figure 3, 10 métasegments précisent les mouvements permis entre les noeuds du réseau. Ici, l'absence de métasegments entre les terminus 1 et 3 n'indique pas nécessairement une absence de liaison routière, mais reflète plutôt une politique interne de la compagnie hypothétique dont le réseau est illustré. Sur ce réseau, les cinq services illustrés à la figure 4 utilisent plusieurs parcours, présentés à la figure 5. En particulier, on peut remarquer qu'un service peut emprunter plusieurs parcours (par exemple, le service S1 en a deux), et qu'un même métasegment peut contribuer à construire les parcours de plusieurs services (tel le métasegment 2 pour les services S1 et S2, 3 pour S3 et S4, etc.).

Un *segment*, $s \in S$, est un métasegment auquel on ajoute une dimension temporelle en spécifiant son *temps du départ* t_s. Ainsi, à un même métasegment (O_s, D_s) peuvent correspondre plusieurs segments, $(O_s, D_s, t_{s1}), (O_s, D_s, t_{s2}), \cdots (O_s, D_s, t_{sn})$ dont

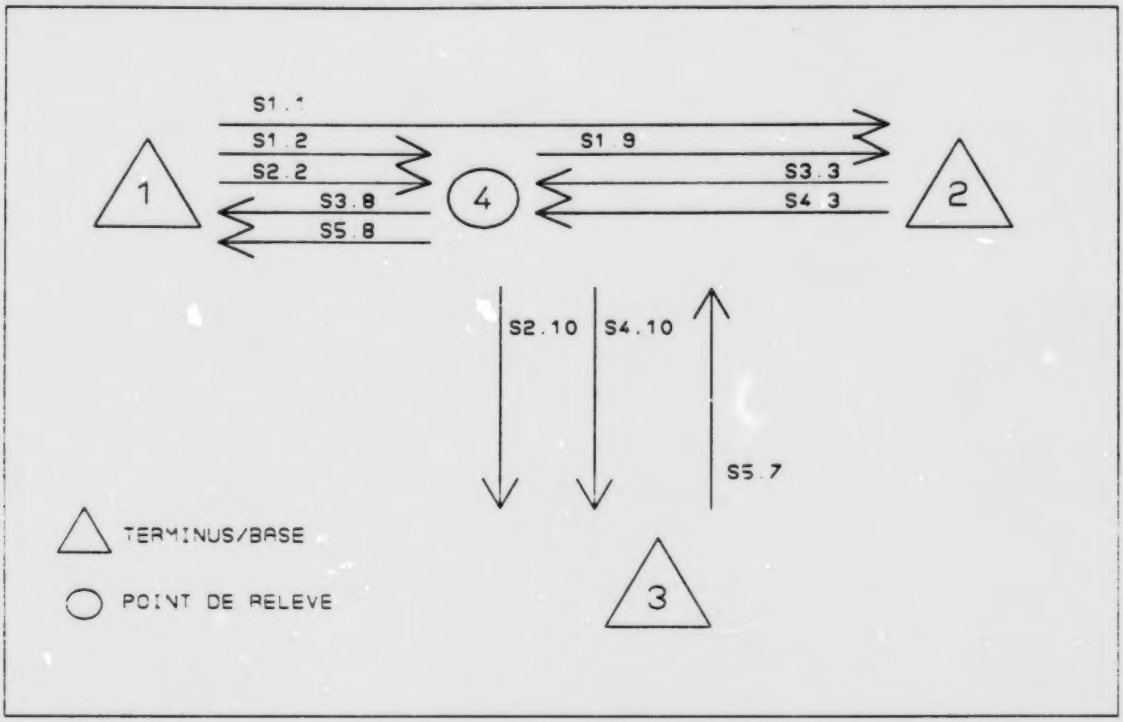


Figure 5. Réseau des parcours (services)

seulement les temps de départ diffèrent. S représente l'ensemble des segments.

Les segments et les métasegments constituent les unités de base qui composent les parcours des services et les routes-horaires des chauffeurs. Ils forment donc un des éléments primordiaux de notre modèle, à qui ils fournissent les contraintes, et de nos procédures d'analyse des services et de génération des routes.

Une *métaroute* est une suite légale de métasegments débutant et finissant à une même base. La métaroute sera dite *normale* si elle ne comporte aucune période de repos à l'extérieur de la base, et *étendue* dans le cas contraire. Une métaroute dont chacun des métasegments la composant n'apparaît qu'une fois est appelée *simple*. Autrement, nous parlerons d'une métaroute *répétitive*. Le tableau 1 contient quelques métaroutes, générées à partir des métasegments du réseau défini à la figure 3. Notons que le métasegment (2,2) représente une période de repos au noeud 2.

Une métaroute r, $r \in \Omega$, où Ω est l'ensemble des métaroutes, est décrite par les attributs suivants:

DESCRIPTION	TYPE
(1,4) (4,3) (3,4) (4,1)	NORMALE – SIMPLE
(1,2) (2,2) (2,4) (4,1)	ETENDUE – SIMPLE
(1,4) (4,1) (1,4) (4,1)	NORMALE – REPETITIVE

Tableau 1. Exemples de métaroutes

- *Base* $b_r, b_r \in B \subseteq N$; la base représente à la fois l'origine et la destination de la métaroute;
- *Composition* κ_r, indiquant la suite de métasegments et, éventuellement, de périodes de repos hors base, la formant;
- *Durée totale* d_r^t, incluant le temps affecté à la conduite du véhicule, l'attente aux noeuds du réseau, ainsi que les périodes de repos;
- *Durée de parcours* d_r^p, indiquant le temps total de conduite calculé comme la somme des durées moyennes de parcours des segments composant la métaroute:

$$d_r^p = \sum_{i \in \kappa_r} d_i^p ;$$

- *Durée de travail* d_r^w, représentant le temps total où le chauffeur est disponible, c.-à-d. lors de la conduite de son véhicule et de l'attente à un noeud pour qu'une opération se complète;
- *Coût* c_r, définit à la section V.

Une *route–horaire* (ou, plus simplement, une *route*) est une suite légale de segments débutant et finissant à la même base. C'est donc une métaroute à laquelle on a adjoint une dimension temporelle en spécifiant les temps du départ de chacun de ses métasegments. Une route a donc un *temps du départ*, noté t_r, correspondant au temps du départ de son premier segment. Les autres définitions et notations relatives aux métaroutes s'étendent également aux routes, avec les ajustements appropriés. En particulier, une route–horaire *répétitive* contient au moins deux occurrences, temporellement différentes, du même métasegment.

Ces routes–horaires constitueront les horaires que les chauffeurs choisiront par ancienneté. Elles sont donc les variables de notre modèle.

IV. GENERATION DES SEGMENTS

Les segments forment les éléments de base de tout le processus. Les routes–horaires, les métaroutes, ainsi que les parcours des services sont construits à partir des segments, qu'ils spécifient ou non une dimension temporelle. De plus, ce sont les segments qui engendrent les contraintes du modèle utilisé pour l'optimisation du choix des routes. Nous reviendrons à cet aspect du problème dans la section VI.

Conceptuellement, les segments sont obtenus à partir des fréquences et des parcours des services spécifiés par le plan de transport. Pour chaque départ d'un service, son parcours est décomposé en métasegments, chacun de ces derniers générant un segment par le calcul de son temps de départ. Ce calcul se fait en additionnant au temps du départ de la base du service les durées des parcours de chacun des métasegments et les durées des arrêts aux noeuds.

Ce processus suppose donc la connaissance préalable des *horaires* qui seront utilisés pour les services: l'heure de départ et le parcours de chaque service à chacune de ses occurrences. Or, en général, cette connaissance n'est qu'approximative.

En effet, pour établir le plan tactique de transport, il n'est pas nécessaire de connaître les parcours exacts et il ne faut pas déterminer les heures de départ pour chaque service. De plus, au niveau opérationnel, le répartiteur peut significativement avancer ou retarder un départ afin d'ajuster l'offre de service à la demande réelle journalière. Pour le problème de l'établissement des routes–horaires régulières, qui se situe à mi-chemin entre le détachement temporel de la planification tactique et le dynamisme des requêtes de la répartition, il faut donc estimer, dans la plupart des cas, une heure de départ et le parcours de chaque service à chacune de ses occurrences.

Si un service de fréquence unitaire ne peut emprunter qu'un seul parcours dans le réseau des métasegments G_Σ, alors le problème se réduit à déterminer l'heure de départ du service et à calculer le temps de départ de chacun des segments le composant, tout en tenant compte de la longueur de la période de planification, de l'heure cible, ou la plus tardive, d'arrivée à destination et des délais de parcours. La très grande majorité des services, cependant, ont à la fois des fréquences supérieures à 1 et la possibilité d'emprunter plusieurs parcours dans G_Σ. Le choix des parcours se fait alors soit selon des critères arbitraires d'usage, d'aisance ou, le plus souvent, pour des raisons économiques.

Ainsi, le service S1, illustré à la figure 4, peut être assuré en utilisant deux parcours: le premier emprunte un seul métasegment, le 1, tandis que le second est composé de deux métasegments, le 2 et le 9. Le premier parcours assure le temps total minimal de parcours, mais oblige le chauffeur à passer une période de repos hors de sa base. Une politique habituelle dans de tels cas est alors d'utiliser le deuxième parcours de la façon suivante: un chauffeur quitte le noeud 1 avec une remorque pour le noeud 2, tandis qu'un autre chauffeur quitte le noeud 2 avec une remorque pour le noeud 1. Au point de relève 4, les deux se rencontrent et un échange de remorques s'effectue, chaque chauffeur revenant à sa base avec son tracteur tirant la remorque de l'autre service. De cette façon, le coût des périodes de repos hors base est économisé, au prix de l'augmentation du temps total de parcours pour le service. En général, on choisit le deuxième parcours pour les départs s'effectuant assez tôt pour permettre son utilisation, le premier parcours n'étant utilisé que pour les départs tardifs, afin d'assurer l'arrivée de la remorque dans les délais prévus.

Il est important de noter que le type d'opération esquissé ci-haut, aussi appelé ''effet Kingston'' du nom de la ville qui traditionnellement sert de point de relève sur la route Montréal–Toronto, est déjà largement utilisé par les entreprises de transport et de distribution canadienne, tant pour son compte propre que pour le compte d'autrui (Bookbinder, 1988). De plus, avec l'entrée en vigueur, le 1er janvier 1989, de la nouvelle réglementation concernant les durées maximales de travail, de parcours et les durées maximales totales des routes légales (ainsi que les dures pénalités en cas de non-respect de la réglementation), il faut s'attendre à des changements majeurs dans les pratiques des transporteurs canadiens et à une utilisation encore plus intensive de ce principe. Nous reviendrons sur certains effets de cette législation à la section V.

Le problème de la génération des segments se présente alors comme le problème combiné de *déterminer et décomposer* les parcours et de *répartir* les fréquences dans le temps, tout en assurant l'arrivée des remorques dans les délais prescrits, la minimisation des temps totaux et la réduction des périodes de repos des chauffeurs à l'extérieur de leur base.

Dans sa forme la plus générale, le problème de la génération des segments est équivalent à celui de l'établissement des horaires des services, c'est-à-dire la détermination simultanée des parcours et des heures de départ pour tous les services. Il faudrait alors travailler sur un réseau dynamique espace–temps afin de permettre la coordination des rencontres, tandis que la

distribution dans le temps de la demande pour chaque marché constituerait la donnée de base du problème. Ce problème présente certes des défis théoriques intéressants et pourrait aussi permettre de dégager des informations utiles pour l'opération du système.

Pour construire des routes–horaires efficaces, la résolution exacte de ce problème n'est cependant pas nécessaire et n'est pas traitée dans ce rapport. En effet, d'un côté, tandis que les distributions exactes des diverses demandes des marchés pour des journées ou périodes déterminées sont extrêmement difficiles à estimer avec une précision acceptable, l'allure générale du comportement temporel des arrivées de marchandises aux terminus et des départs des services est généralement bien connue (nous travaillons avec la partie régulière de la demande). D'un autre côté, la coordination précise et journalière des départs se fait en temps réel, lors du dispatching, le chauffeur ne connaissant qu'une plage horaire assez large (de l'ordre de trois heures; voir Blanchette, 1989) à l'intérieur de laquelle le départ s'effectuera. Il est par ailleurs intéressant de noter que l'absence d'horaires précis pour les services et les segments est une des différences majeures entre le problème de l'établissement de routes–horaires dans le camionnage de charges partielles et le problème équivalent dans l'aviation civile.

Nous avons donc choisi de déterminer les heures de départ à partir de ces distributions connues, tout en accroissant la souplesse du générateur des routes (voir section V) afin de tenir compte du problème de la coordination des rencontres pour échanger des remorques. Le processus traite chaque service séparément et consiste en deux étapes. La première assigne à chaque jour un nombre de départs, à partir de la fréquence du service pour la période de planification. Ces départs sont ensuite répartis, pour chaque journée, à l'intérieur d'une plage-horaire permettant de compléter la consolidation du premier départ et l'arrivée à temps à destination du dernier.

En l'absence de toute information supplémentaire, les deux répartitions se font de manière uniforme sur l'intervalle considéré. Ces distributions peuvent aussi être ajustées pour tenir compte de certaines connaissances particulières. Il est ainsi généralement admis que, lorsque plusieurs départs sont prévus dans une même soirée pour un service donné, il y a un départ relativement tôt, un autre très tard (le plus tard possible, mais qui puisse encore arriver à temps), tandis que les autres sont groupés dans la portion la plus achalandée de la soirée. Nous présentons la méthode particulière utilisée dans notre application à la section VII.

Quant à la détermination des parcours, on peut utiliser des trajets historiques. Cette approche peut cependant biaiser la solution. Nous proposons donc d'utiliser une méthode faisant appel à des techniques de *plus courts chemins*.

L'algorithme travaille sur le réseau des métasegments G_Σ. A chaque noeud j on associe comme coût sa durée moyenne d'opération, $c_j = d_j^n$. Le coût de chaque arc $s = (i,j)$, $s \in \Sigma$, est "normalement" donné par sa durée moyenne de parcours, $c_{ij} = d_{ij}^s$. Nous définissons aussi un coût *pénalisé* de l'arc lorsque la longueur du métasegment empêche de former une route d'une journée. Le coût de l'arc est alors

$$c_{ij} = \begin{cases} d_{ij}^s & \text{si} \quad d_{ij}^s \leq \dfrac{t^o}{2} \\ d_{ij}^s + K^{hb} & \text{sinon} \end{cases}$$

où t^o représente la durée maximum de travail permise dans une journée et K^{hb} indique l'équivalent en heures du coût d'une période de repos hors base.

Pour un service et une journée donnés, l'algorithme fonctionne comme suit:

INITIALISATION.

- Soit le service (O, D), de fréquence (journalière) f;
  Soit t_i, $i = 1, ..., f$, les temps de départ de ces occurrences;
  Soit L_{max} le moment le plus tardif (pour le service) pour que l'arrivée à D, la destination du service, soit à temps;
- $i = 1$;

ETAPE 1.

- Trouver le chemin le plus court de O à D dans G_Σ en utilisant les coûts pénalisés des arcs;
- Soit L la longueur en heures de ce chemin;

ETAPE 2.

- Tant que $i \leq f$ et $t_i + L \leq L_{max}$ faire
  - Retenir le chemin le plus court comme parcours du service;
  - Décomposer ce parcours et calculer les temps de départ de ses segments;

- $i = i + 1$.

ETAPE 3.

- Si $i > f$ alors STOP; sinon
  - Trouver le chemin le plus court de O à D dans G_Σ en utilisant les coûts normaux des arcs;
  - Tant que $i \leq f$ faire
    - Retenir le chemin le plus court comme parcours du service;
    - Décomposer ce parcours et calculer les temps de départ de ses segments;
    - $i = i + 1$.
  - STOP

L'algorithme se base sur l'observation suivante: la préférence est accordée aux routes–horaires normales (ne comportant pas de périodes de repos hors base) tant que les remorques arrivent à destination à temps pour permettre le déroulement prévu des opérations à ce noeud (déchargement, tri et consolidation, livraison, etc...). En calculant le chemin le plus court avec les coûts pénalisés des arcs, nous nous assurons donc qu'un parcours générant des périodes de repos hors base n'est choisi que lorsque le coût supplémentaire du temps (opérations aux noeuds et, éventuellement, plus longue conduite) engendré par tout autre parcours moins ''direct'' dépasse le coût de cette période de repos. Ce parcours peut être utilisé ensuite pour tous les départs du service, tant que les délais d'arrivée des remorques à destination sont respectés. Lorsque, dû à l'heure trop tardive de certains départs, cela n'est plus possible, le chemin le plus court en temps doit être utilisé. Les temps normaux des métasegments du réseau sont donc utilisés pour la génération du parcours à emprunter pour ces départs.

La génération des segments constitue une des composantes du système où l'interaction avec l'utilisateur peut apporter beaucoup de bénéfices. Mentionnons, qu'outre les analyses effectuées a posteriori sur les résultats fournis par la procédure, l'utilisateur peut jouer un rôle de premier plan lors de la spécification des temps de départ des services, ainsi que pour le choix des parcours.

V. GENERATION DES ROUTES – HORAIRES

Le but de nos efforts consiste à sélectionner le meilleur ensemble de routes–horaires qui recouvrent les segments générés précédemment, provenant, à leur tour, des services prévus dans le plan de transport pour répondre à la demande "sûre" de transport. Dans notre approche cette sélection se fait en trois étapes:

1) génération d'un ensemble de routes–horaires légales;
2) choix d'un "bon" sous-ensemble;
3) amélioration de la solution par techniques de post-optimisation.

Cette section est dédiée à la présentation de la première étape de ce processus.

Une route–horaire est un arrangement (dans le sens combinatoire du terme) légal de quelques segments, de périodes d'attente et, éventuellement, de périodes de repos hors base. La légalité d'une route n'étant principalement déterminée que par la longueur de ses périodes de travail et la réalisabilité des opérations aux noeuds, le nombre potentiel de routes légales est donc très élevé, surtout lorsque les routes étendues sont considérées. Générer toutes ces routes représente un processus extrêmement long et coûteux. De plus, la taille finale d'un tel ensemble rendrait douteuse l'existence d'un algorithme efficace pour effectuer le choix optimal des routes.

Notre approche vise à contourner ces difficultés en décomposant le problème selon des critères suggérés par sa structure même. Ainsi, les routes étendues forment à la fois l'ensemble le plus nombreux parmi les routes légales et le type d'horaire le moins souhaité. En effet, non seulement il implique des coûts additionnels pour les périodes de repos hors base, mais aussi, dans le contexte canadien, la densité relativement élévée des réseaux de terminus des transporteurs de LTL, la facilité d'organiser des points de relève (ceci constitue une différence évidente et importante avec le problème équivalent en transport aérien) et la nouvelle législation concernant les limites des périodes de travail, incitent les transporteurs de LTL à éviter l'utilisation de ce type de routes.

Nous avons donc relégué la considération des routes–horaires étendues à la phase de post-optimisation de notre méthode, ce qui nous permet de limiter la portée de la procédure de génération des routes à la recherche des routes normales. Celle-ci se fait en deux phases, selon que l'on permet, ou non, à une route–horaire de repasser par la base. Ces deux phases

sont présentées aux sections 5.2 et 5.3. La génération de routes–horaires étendues est discutée à la section 5.4. Mais d'abord, examinons la structure de coût à utiliser pour les routes–horaires, étant donné l'objectif de l'algorithme d'optimisation.

5.1 Structure de coûts

Les chauffeurs sont normalement payés selon des formules, précisées dans les conventions collectives, qui garantissent un minimum d'heures de travail pour chaque période. Les formules spécifient aussi les amplitudes maximum, ainsi que les taux horaires pour le temps régulier et pour le temps supplémentaire. Un exemple réaliste d'une telle formule indiquerait 9 heures de travail garanties par période, avec une amplitude normale de 12 heures (incluant les pauses repas) et une extension maximum de 14 heures en temps supplémentaire. Des taux kilométriques variant selon la route, des taux horaires différents selon la longueur de la période, divers surcharges et coûts pour frais auxiliaires, viennent encore compliquer le calcul des coûts des routes en camionnage LTL. Voir Blanchette (1989) pour une présentation d'une telle procédure de calcul pour un transporteur canadien. La similitude entre cette procédure et celle qu'on retrouve dans le contexte du transport aérien en Amérique du Nord est notable.

Une modélisation réaliste du coût *réel* γ_r , d'une route normale est:

$$\gamma_r = \begin{cases} K^f & \text{si } 0 \le d_r^w \le t^f \\ K^f + c_r^n\,(d_r^w - t^f) & \text{si } t^f \le d_r^w \le t^n \\ K^f + c_r^n\,(t^n - t^f) + c_r^o\,(d_r^w - t^n) & \text{si } t^n \le d_r^w \le t^o \end{cases}$$

où

t^f : temps minimum garanti pour une période;
t^n : amplitude normale de travail;
t^o : amplitude maximum en temps supplémentaire;
K^f : coût du temps minimum garanti;
c_r^n : taux horaire régulier pour la route r;
c_r^o : taux horaire en temps supplémentaire pour la route r;

et la route est, bien entendu, légale: $0 \le d_r^w \le t^o$. La figure 6 illustre ce type de formule de coût. Notons que pour une route normale la durée totale égale la durée de travail, $d_r^t = d_r^w$. Si la route est étendue, alors cette formule est utilisée pour chacune de ses périodes de travail, la

somme des coûts résultants (plus le coût des frais auxiliaires) indiquant le coût de la route.

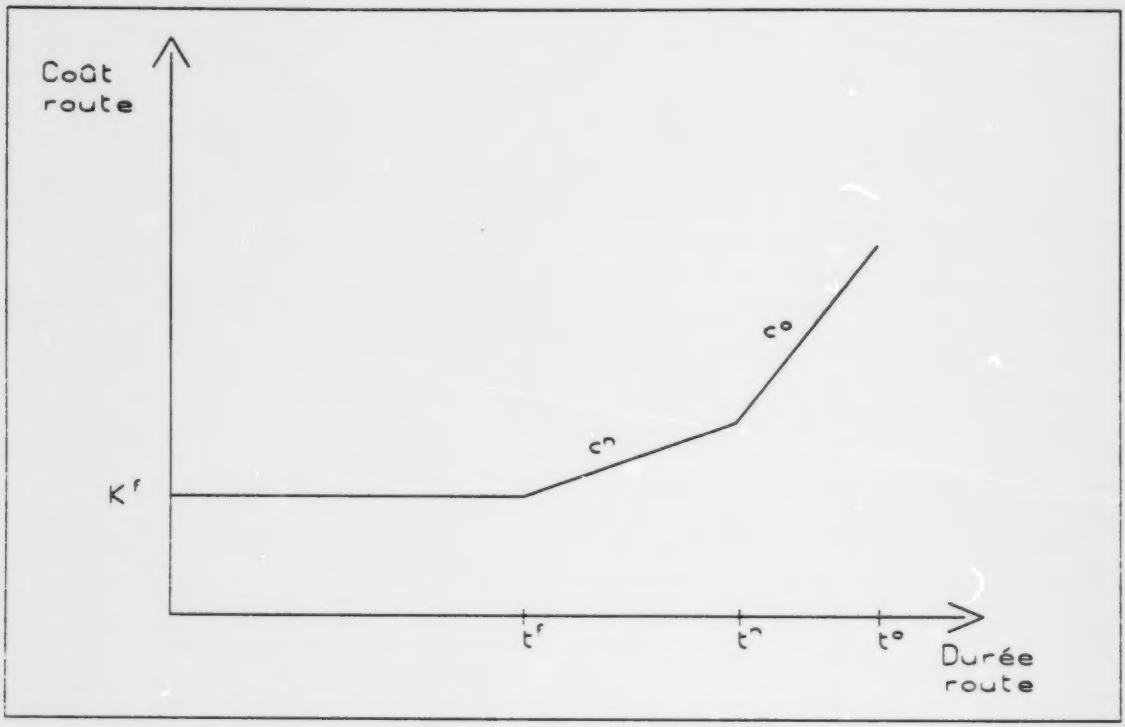


Figure 6. Fonction de coût réel pour une route

Une fonction de coût de ce type n'est cependant pas suffisamment discriminante et n'est donc pas adéquate pour former la fonction objectif d'un modèle d'optimisation pour le choix des routes. Deux classes de problèmes, reliés à la notion de *productivité* des routes, justifient cette affirmation.

Premièrement, toute route dont la durée est inférieure au temps minimum garanti reçoit le même coût K^f, indépendamment de sa durée réelle. Deuxièmement, ce type de formule ne peut pas identifier les opérations dont les durées composent celle de la route pour laquelle le chauffeur est payé. Or, si nous considérons que la partie la plus productive du travail d'un chauffeur consiste à *conduire* le camion, à coût égal, nous préférons une route avec un minimum de temps de travail provenant des opérations et délais aux noeuds.

Nous recherchons donc une formulation alternative pour calculer le coût d'une route, afin que lors de l'optimisation du choix des routes, les plus productives soient préférées. Plusieurs possibilités s'offrent à nous.

Hypothèse 1.

Calculer un *coût moyen horaire* pour la route et l'utiliser comme coût:

$$c_r = \frac{\gamma_r}{d_r^w}.$$

Hypothèse 2.

Calculer un *coût unitaire moyen* sur [0, t^o] :

$$c_r^m = c_r^o\, t^o - \frac{K^f}{t^o}$$

à utiliser ensuite pour calculer le coût de la route

$$c_r = c_r^m\, d_r^w.$$

Ces deux hypothèses, ainsi que toutes leurs variantes, sont simples, voir simplistes. Elles impliquent un effort de calcul limité et corrigent le premier problème par la pénalisation des routes trop courtes. Ces méthodes ne touchent toutefois en rien au problème de productivité relié à la composition des routes et, de plus, ont tendance à diluer l'effet du temps supplémentaire.

Hypothèse 3.

Associer un coût horaire K^i au *temps d'inactivité*, défini comme l'écart entre le temps travaillé et l'amplitude normale de travail, et calculer le coût de la route:

$$\gamma_r = \begin{cases} K^f + K^i\,(t^n - d_r^w) & \text{si } 0 \le d_r^w \le t^f \\ K^f + c_r^n\,(d_r^w - t^f) + K^i\,(t^n - d_r^w) & \text{si } t^f \le d_r^w \le t^n \\ K^f + c_r^n\,(t^n - t^f) + c_r^o\,(d_r^w - t^n) & \text{si } t^n \le d_r^w \le t^o \end{cases}$$

Une pénalité pourrait également être ajoutée aux heures de travail supplémentaire.

Pour l'hypothèse 3, nous supposons que l'amplitude de travail régulier représente un but à atteindre pour la durée d'une route productive. Une telle formule présente l'avantage de fournir des évaluations proches des coûts réels des routes, tout en pénalisant celles de courte durée et, lorsque désiré, celles comportant des heures supplémentaires. De plus, le *coût d'inactivité* K^i, offre l'occasion d'effectuer des analyses fort intéressantes concernant la valeur du temps des diverses activités.

La calibration de ce même coût présente toutefois un problème de taille. De plus, cette classe de formules ne résout pas vraiment le problème de la productivité relié à la composition des routes: deux routes de même longueur coûteront toujours le même montant indépendamment de leurs ratios respectifs, temps de conduite versus temps d'attente.

Hypothèse 4.

Définir le coût de la route comme le temps rémunéré mais non dédié à la conduite du véhicule. Le *temps rémunéré* d'une route normale, d_r^S, se définit comme suit:

$$d_r^S = \begin{cases} t^f & \text{si } 0 \le d_r^w \le t^f \\ d_r^w & \text{si } t^f \le d_r^w \le t^n \\ t^n + \dfrac{c_r^o}{c_r^n}\,(d_r^w - t^n) & \text{si } t^n \le d_r^w \le t^o \end{cases}$$

Le coût de la route est alors

$$c_r = d_r^S - d_r^p.$$

Pour une route étendue sur n périodes de travail, le coût est calculé de façon similaire. Nous calculons, par la même formule, les temps rémunérés pour chacune des périodes de la route, $d\$i, i = 1, \cdots, n$, son coût étant ensuite donné par:

$$c_r = \sum_{i \in \kappa_r} d\$i + n\,K^{hb} - d_r^p.$$

La classe de fonctions de coût décrite par l'hypothèse 4 corrige adéquatement les deux types de problèmes mentionnés ci-haut, en assumant que le temps alloué à des opérations autres que la conduite du camion n'est pas productif et, donc, que l'ensemble de routes le plus intéressant est celui qui minimise ces temps. Pour cela, toutes les opérations et activités

(heures supplémentaires, périodes de repos hors base, etc.) sont d'abord évaluées en termes d'heures de travail régulier. Notons que le facteur utilisé pour la transformation des heures supplémentaires ne représente pas un choix absolu. Il semble toutefois raisonnable d'utiliser à cette fin le ratio des taux horaires du travail régulier et en temps supplémentaire.

Le temps rémunéré ainsi calculé est ensuite comparé à la durée totale du parcours de la route afin de lui attribuer la différence comme coût. Ainsi, non seulement les routes de courte durée seront marquées comme "plus coûteuses", mais aussi celles comportant beaucoup de temps supplémentaire ou de longues périodes d'attente aux noeuds du système.

Nous estimons donc que cette approche représente la meilleure façon d'évaluer les coûts des routes pour les fins d'un modèle d'optimisation de leur choix. Notons que nous retrouvons ici des similitudes frappantes avec la manière d'évaluer les coûts des rotations dans le problème d'établissement des horaires des pilotes dans certaines compagnies d'aviation (voir, par exemple, Crainic et Rousseau, 1987).

Remarquons finalement que toutes ces formules, tant celles de coût réel que celles des dernières hypothèses, sont intrinsèquement nonlinéaires (ceci se vérifie aussi dans le domaine de l'aviation). Ainsi, la modification au coût d'une route, due à l'ajout d'un segment, varie selon la place que le segment occupe et selon la longueur courante de la route. Ceci a comme conséquence immédiate de ne pas pouvoir associer directement un coût à un segment **avant** la création de la route. Ce phénomène explique aussi pourquoi il faut faire appel à une procédure de chaînage afin de générer des routes, au lieu d'utiliser des techniques plus efficaces telles, par exemple, les méthodes de chemins les plus courts.

5.2 Génération de routes normales.

Par définition, une route normale est composée de segments provenant tous de la même journée. Nous pouvons donc générer séparément et indépendamment les routes normales pour chaque période.

Un deuxième critère de décomposition vient du fait que chaque chauffeur, et donc chaque route, est attaché à une base. Nous pouvons donc considérer séparément la construction des routes normales débutant à chacune des bases présentes dans le système.

La génération des routes normales, à partir d'une base donnée et pour un jour spécifié, se fait donc par une procédure de chaînage qui parcourt la liste des segments et, systématiquement, construit les routes respectant certains critères de légalité et d'efficacité.

La meilleure façon de décrire la procédure est en termes d'un algorithme *d'énumération implicite*.

Chaque *noeud* de l'arbre d'énumération correspond à un noeud du réseau et à une position (niveau par rapport à la base) dans la composition des routes. La base se trouve au niveau zéro et forme la *racine* de l'arbre. Les *branches* de l'arbre sont constituées par les segments qui débutent à chaque noeud.

Lorsque les segments débutant à chaque noeud sont ordonnés, de façon ascendante selon le temps de départ et la destination, la génération des routes se fait en parcourant en *préordre* l'arbre d'énumération. L'élagage de branches se fait à partir des règles de légalité et d'efficacité.

Le premier critère d'élagage concerne la légalité des routes par rapport à leur longueur totale qui ne devrait pas dépasser l'amplitude maximale indiquée.

Le deuxième concerne le temps d'arrêt à un noeud. Dans une première approche, ce temps peut être borné inférieurement par la durée de l'opération au noeud et supérieurement par le temps restant avant que la durée de la route atteigne l'amplitude maximale. Cependant, cette deuxième borne est généralement trop grande, permettant des délais trop importants pour que les routes impliquées soient ''intuitivement'', et administrativement, acceptables. Nous avons donc imposé une *amplitute maximale d'arrêt* pour remplacer les deux bornes et contrôler ce facteur. Ce paramètre permet également d'influencer le nombre total de routes générées et introduit une dimension heuristique dans notre procédure.

Toujours pour le critère du temps d'arrêt, nous avons introduit également un paramètre définissant l'amplitude de la *période de chevauchement*. Ce paramètre permet une connection avec un segment dont le temps de départ est antérieur au temps d'arrivée au noeud. Nous avons introduit cette possibilité pour compenser, en partie, l'imprécision éventuelle quant à la spécification des temps de départ dans la génération des segments. La présence dans la solution finale d'une route comportant un tel chevauchement indiquera donc que des ajustements

doivent être effectués aux temps de départ des segments. Ces ajustements n'affecteront que les segments formant la route et se feront soit automatiquement, soit interactivement, lors des diverses phases de post-optimisation. Il faut noter cependant, qu'afin de minimiser ces ajustements et permettre un calcul correct du coût et de la productivité de la route, la durée de l'opération au noeud est comptabilisée dans la durée de la route lorsqu'un chevauchement y est inclus. Les valeurs associées à ces paramètres, lors de nos tests, sont de deux heures pour l'amplitude maximale d'arrêt et de quatre heures pour la période de chevauchement.

L'énumération est aussi arrêtée, et la sous-branche élaguée, lorsqu'un segment revient à la base. Nous avons alors une route normale *sans retours* légale qui est emmagasinée.

Il faut noter que les routes ainsi générées ne sont pas nécessairement simples, mais qu'aucune ne contient la base comme noeud intermédiaire (routes normales *sans retours*). Des routes normales *avec retours* seront ensuite formées, en combinant les routes de ce premier ensemble. Cette procédure permet, si désiré, de diminuer le nombre total de routes–horaires retenues pour la phase d'optimisation et fait l'objet de la prochaine sous-section.

Lorsqu'à partir d'un noeud de l'arbre, le prochain segment, soit conduit à la base, soit entraîne la violation de la restriction sur la durée totale de la route, soit, enfin, a un temps de départ qui ne respecte pas la période de chevauchement, l'algorithme passe alors au prochain segment au même niveau. Cependant, lorsque dans la même situation, soit tous les segments sont épuisés, soit, ce qui est plus fréquent, la durée du prochain segment entraîne la violation de la restriction d'amplitude maximale d'arrêt, alors l'algorithme normalement recule au niveau précédent (''backtracking'').

Avant d'effectuer ce recul cependant, la procédure vérifie si la route ne peut être continuée en utilisant un ''nu''. Un ''nu'' est un mouvement du chauffeur et de son tracteur, sans remorque. Ce type de mouvement, parfois utilisé pour repositionner le chauffeur ou le tracteur, doit en général être évité et nous ne le retiendrons pas dans la plupart des cas.

Il est tout à fait possible, cependant, que le chauffeur arrive trop tard à un noeud pour pouvoir prendre un chargement, mais qu'en se déplaçant jusqu'à un noeud voisin il puisse continuer sa route. C'est dans ce cas que nous considérons la possibilité d'utiliser un ''nu''.

Plusieurs conditions doivent être respectées cependant. Il faut d'abord qu'il n'y ait pas déjà trop de routes utilisant des "nus" à partir du noeud courant (nous estimons qu'un maximum de quatre ou cinq serait acceptable), ni que le segment précédent soit lui-même un "nu". Le "nu" doit aussi utiliser un des métasegments déjà définis et ne pas violer les restrictions concernant la durée totale de la route. Lorsque toutes ces conditions sont respectées, le "nu" est inséré comme un segment normal et l'énumération continue. Mentionnons finalement qu'avant de reculer ("backtracking"), nous conservons les routes partielles obtenues pour utilisation dans la phase de génération des routes étendues.

5.3 Génération de routes normales avec retours

A la fin de l'étape de génération décrite à la section précédente, toute route–horaire retenue n'utilise sa base que comme point initial et terminal de son parcours. Des routes normales avec retours, utilisant donc leur base comme noeud intermédiaire, sont ensuite générées, par la combinaison de deux routes, ou plus, parmi les premières. Il n'est évidemment pas intéressant de générer des routes étendues avec retours.

La génération se fait par une procédure de chaînage similaire à celle décrite dans la section 5.2. Les règles de légalité considérées concernent les temps nécessaires pour effectuer les opérations aux noeuds et la durée maximale totale de la route. Les critères concernant la période de chevauchement s'appliquent également ici.

L'efficacité de la procédure peut être significativement accrue en n'admettant pas à cette étape les routes sans retours qui manifestement ne peuvent appartenir à aucune combinaison légale. En particulier, soit $d_b^{\min}$ la durée minimale des routes–horaires sans retours débutant à une base b. Alors, toute route sans retours dont la durée est telle que

$$d_r^t \geq t^o - (d_b^{\min} + d_b^n)$$

ne peut appartenir à aucune route légale avec retours et n'a donc pas à être considérée par la procédure de génération.

Le nombre de routes–horaires retenues peut être réduit encore d'avantage en utilisant la proposition suivante (dont la preuve est triviale) comme critère d'élagage:

Proposition 1 Soit une route–horaire avec retours r formée par la combinaison d'un certain nombre de routes sans retours, contenues dans l'ensemble κ_r. Si

$$c_r > \sum_{k \in \kappa_r} c_k$$

alors la route–horaire r peut ne pas être retenue car elle n'apparaîtra dans aucune solution optimale du modèle de choix de route (section VI).

L'inverse de cette proposition n'est cependant pas vrai, pour la plupart des cas, tel qu'expliqué dans la section 6.2. En effet, on ne peut éliminer les routes–horaires de l'ensemble κ_r, sans affecter la solution optimale du modèle (PRH) présenté à la section VI, que si $c_k \leq \min_{k \in \kappa_r} \{ c_k \}$. Cette éventualité est peu probable, exigeant que toutes les routes sans retours soient très courtes. De plus, il n'est pas pratique d'éliminer des routes avant d'avoir compléter la génération des routes avec retours, afin de ne pas ainsi éliminer des combinaisons potentiellement intéressantes. Nous n'avons donc pas implanté ce dernier critère.

Remarquons, finalement, que l'exécution de la phase de génération des routes–horaires avec retours peut être partiellement ou totalement retardée jusqu'à l'étape du choix de l'ensemble optimal de routes où elle peut s'insérer dans un schéma de génération progressive de colonnes.

5.4 Génération de routes–horaires étendues

Une route–horaire étendue est une suite de segments et de périodes de repos hors base. Théoriquement donc, la génération de telles routes pourrait se faire par des procédures de chaînage, similaires à celles décrites précédemment. Cependant, des études effectuées pour d'autres modes de transport (Crainic et Rousseau, 1987; Lavoie, Minoux et Odier, 1985, etc.) ont montré qu'il est plus avantageux de considérer la définition des routes étendues en termes d'une suite alternée de journées de travail et de périodes de repos hors base.

La génération de routes–horaires étendues s'effectue alors en deux phases:

(1) génération des journées de travail;

(2) formation des routes en combinant les journées de travail et les périodes de repos.

Le principal atout de cette façon de procéder est de permettre de ne générer qu'un nombre relativement petit de "bonnes" routes étendues. En effet, les journées de travail sont relativement peu nombreuses et peuvent être toutes créées en même temps que les routes normales, au début du processus. La génération des routes–horaires étendues peut être ensuite retardée et intégrée au processus de résolution à travers une procédure de génération progressive de colonnes. Ce type d'approche a donné d'excellents résultats pour la résolution des problèmes de construction de routes et horaires dans un grand nombre de situations (Crainic et Rousseau, 1986; Crainic et Rousseau, 1987; Lavoie, Minoux et Odier, 1985; Desrochers, 1986; etc.).

Dans notre cas, les journées de travail débutant ou finissant à une base sont générées en même temps que les routes normales; ce sont les routes partielles mentionnées à la fin de la section 5.2. Dans le cas où des routes partielles peuvent finir ailleurs que dans une base, il faudrait aussi générer des journées de travail débutant, et finissant, à ces noeuds.

Deux approches, toutes les deux développées pour le problème de l'établissement des horaires des pilotes d'avion, sont possibles pour assurer la génération des routes–horaires étendues.

Selon l'approche de Lavoie, Minoux et Odier (1985), les routes sont générées en appliquant un algorithme de chemin le plus court sur un diagramme espace–temps étendu, dont les noeuds correspondent à divers "états" des journées de travail (selon leur place dans la route et les caractéristiques de durée de celle-ci) et dont les liens indiquent des enchaînements légaux entre les journées.

L'approche de Crainic et Rousseau (1987) est une procédure de chaînage, similaire à celle utilisée dans la section 5.3 pour générer des routes normales avec retours. L'efficacité de cette procédure est assurée par l'utilisation de critères stricts qui limitent l'accès des journées de travail au processus de génération.

En comparant les deux approches, nous remarquons qu'une partie du travail préliminaire (génération des journées de travail) est la même, mais que pour la première, il faut en plus énumérer les états et construire le graphe étendu. La première approche apparaît donc comme étant d'autant plus efficace que le nombre de journées de travail composant la route est élevé et que le nombre d'états possibles est petit. Ce dernier critère est satisfait dans le cas du

camionnage de LTL où relativement peu de conditions de légalité interviennent dans la définition des routes. Toutefois, la longueur des routes-horaires est en général très limitée. En effet, toutes les routes étendues que nous avons trouvées dans les données d'exploitation que nous avons consultées, comprenaient deux journées de travail seulement.

Nous prévoyons donc utiliser l'approche d'énumération de Crainic et Rousseau (1987), sauf pour les cas où on sait que des routes étendues de longue durée sont opérationnellement et économiquement intéressantes.

VI. CHOIX DE L'ENSEMBLE OPTIMAL DE ROUTES – HORAIRES

Cette section est dédiée à la présentation de l'approche algorithmique que nous proposons pour effectuer le choix optimal de routes–horaires afin de satisfaire la demande exprimée par les segments. Nous examinons d'abord la formulation mathématique du problème, ainsi que quelques propriétés utiles lors des diverses procédures. La méthodologie de résolution fait l'objet de la prochaine sous-section, suivie de la description des procédures pour calculer des coûts marginaux et pour utiliser, si nécessaire, une approche de génération de colonnes.

6.1 Le modèle

Précisons d'abord quelques définitions et éléments de notation.

La période de planification est formée de p périodes ou journées (habituellement 5). Conséquemment, l'ensemble des segments se décompose en p sous-ensembles mutuellement exclusifs:

$$S_j = \{\, s \in S \mid \text{le segment débute à la période } j,\ 1 \le j \le p \,\}$$

$$S = S_1 \cup S_2 \cup \ldots \cup S_p \quad \text{et} \quad S_j \cap S_i = \varnothing \ \ \forall\ i,j \ \ 1 \le i,j \le p.$$

Notons $n_S = |S|$, la cardinalité de l'ensemble S et n_{S_j} celle de l'ensemble S_j, $1 \le j \le p$.

Soit R, l'ensemble des routes–horaires. Une route–horaire r, $r \in R$, a un coût c_r et est composée d'une suite de segments et, éventuellement, de périodes de repos hors base. Réécrivons κ_r, la composition de la route–horaire r, comme un vecteur $a_r = (a_{ir}) \ge 0$, de dimension $(1 \times n_S)$, où

$$a_{ir} = \begin{cases} 1 & \text{si le segment } i \text{ est contenu dans la route } r, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Parallèlement à la classification des segments, l'ensemble des routes–horaires, R, se sépare en $p + 1$ sous-ensembles $R_1, R_2, \cdots R_p, R_e$, où

$$R_j = \{\, r \in R \mid \forall\ s \in \kappa_r, s \in S_j \,\} \quad 1 \le j \le p$$

$$R_e = \{\, r \in R \mid r \text{ route étendue} \,\}.$$

Les ensembles R_j, $1 \leq j \leq p$ contiennent donc uniquement des routes–horaires normales. Notons $n_R = |R|$, la cardinalité de l'ensemble R et n_{R_j} celle de l'ensemble R_j, $1 \leq j \leq p+1$.

Définissons les variables de décision:

$$x_r = \begin{cases} 1 & \text{si la route } r,\ r \in R \text{ est choisie,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Le modèle du choix de l'ensemble optimal des routes–horaires s'écrit alors:

$$(PRH) \qquad \textit{Minimiser} \sum_{r \in R} c_r x_r$$

$$\textit{Sujet à} \sum_{r \in R} a_{ir} x_r \geq 1 \qquad \forall s \in S$$

$$x_r \in \{0, 1\} \qquad \forall r \in R$$

Ce modèle suit la formulation classique d'un modèle de *recouvrement d'ensembles* (Salkin, 1975 ou Garfinkel et Nemhauser, 1972).

Le signe d'inégalité dans la contrainte de recouvrement indique qu'un même segment pourra être recouvert par plusieurs routes sélectionnées dans la solution optimale. Cette situation correspond soit à un ''nu'', soit au transport d'un chauffeur jusqu'à un point donné du réseau où il prend un tracteur et la (les) remorque(s) prévue(s). Ces cas sont indésirables et, en pratique, assez rares. Nous devons cependant en tenir compte. Nous avons donc dû, pour en assurer la réalisabilité, choisir un modèle de *recouvrement* plutôt qu'un modèle, plus intuitivement approprié, de *partitionnement* d'ensembles. Nous reviendons à ce problème lors de l'analyse des résultats (section VII).

La structure des contraintes du modèle est représentée par la matrice A, de dimension $(n_S \times n_R)$, dont chaque colonne $A_{\bullet r}$ correspond à une route–horaire r, $r \in R$, tandis que chaque ligne $A_{i\bullet}$ correspond à un segment i, $i \in S$. Cette structure, illustrée à la figure 7, suggère une approche ''naturelle'' de décomposition pour la résolution du problème. Nous présentons cette approche immédiatement après l'examen des règles de réduction de la matrice de contraintes.

6.2 Règles de réduction

Plusieurs règles ont été proposées dans la littérature traitant des problèmes classiques de recouvrement d'ensembles (voir, entre autres, Salkin, 1975 ou Garfinkel et Nemhauser, 1972), afin de réduire la taille de la matrice de contraintes sans affecter l'optimalité de la solution.

Quoique mathématiquement exactes et intuitivement attirantes, ces règles ne sont toutefois pas toujours pratiques, surtout lorsque le problème est de très grande taille. Ceci est principalement dû au fait que toutes les colonnes doivent être générées avant que les règles puissent être appliquées.

Etant donné l'approche de résolution que nous proposons pour le problème de l'établissement des routes–horaires, certaines de ces règles peuvent cependant être appliquées avec succès, soit lors de l'optimisation, soit lors de la génération des routes normales.

Règle 1 (couverture unique)

Si pour un i et un r quelconques, $A_{i\bullet} = (e_r)^T$, où e_r représente le vecteur unitaire d'ordre r, alors dans toute solution optimale $x_r = 1$. La colonne $A_{\bullet r}$ ainsi que la ligne $A_{i\bullet}$ peuvent donc être éliminées. Peuvent être également éliminées toutes les lignes $A_{s\bullet}$ telles que $a_{sr} = 1$.

Règle 2 (dominance de ligne)

Soit $A_{i\bullet}$ et $A_{j\bullet}$ deux lignes de A tel que $A_{j\bullet} \geq A_{i\bullet}$. Alors la ligne $A_{j\bullet}$ peut être éliminée (la ligne $A_{i\bullet}$ domine la ligne $A_{j\bullet}$).

Règle 3 (dominance de colonnes)

Soit une colonne $A_{\bullet r}$ et un sous-ensemble de colonnes ρ, $\rho \subseteq R$, tel que:

$$\sum_{l \in \rho} A_{\bullet l} \geq A_{\bullet r} \quad \text{et} \quad \sum_{l \in \rho} c_l \leq c_r$$

alors la colonne $A_{\bullet r}$ peut être éliminée (les colonnes de l'ensemble ρ dominent la colonne $A_{\bullet r}$).

Les deux premières règles peuvent être appliquées lors de la résolution de chaque sous-problème défini dans la section 6.3. Quant à la règle 3, l'appliquer systématiquement à toutes

les routes et en utilisant tous les ensembles ρ possibles, représente une tâche dont le coût et la complexité dépasseraient largement tout bénéfice escompté. Elle peut cependant être utilisée efficacement lors de la deuxième phase de la génération des routes normales décrite dans la section 5.3. En effet, lors de la première phase de génération des routes–horaires, nous obtenons des routes normales qui ne contiennent pas la base comme noeud intermédiaire. Dans la deuxième phase du processus, ces routes sont légalement combinées afin de former des routes–horaires normales avec retours. A chaque fois qu'une combinaison légale est déterminée, la règle 3 peut être appliquée pour décider si la nouvelle route doit être rejetée.

Remarquons que dans le cas présent, le critère de couverture de la règle 3 est toujours satisfait et que la décision se fait uniquement à partir des coûts. Il serait donc tentant de conclure que lorsque la nouvelle route est acceptée (donc $\sum_{l \in \rho} c_l \geq c_r$), les routes la composant peuvent être éliminées. Malheureusement ceci n'est généralement pas le cas sauf lorsque: (i) toutes ces routes sont dans la solution optimale, ou (ii) toutes les routes composantes ne sont pas dans la solution optimale, ou (iii) le coût de la nouvelle route est inférieur à celui de n'importe laquelle des routes la composant.

Les deux premiers cas ne présentent aucun intérêt pratique, ce qui est également vrai pour le troisième dans le contexte général des problèmes de recouvrement d'ensembles. Dans le cas présent cependant, la structure des coûts qui pénalise les routes courtes, peut rendre intéressante l'application de la règle suivante:

Règle 3' (dominance de colonne)

Soit une colonne $A_{\bullet r}$ et un sous-ensemble de colonnes ρ, $\rho \subseteq R$, tel que:

$$\sum_{l \in \rho} A_{\bullet l} = A_{\bullet r} \quad \text{et} \quad c_r \leq \underset{l \in \rho}{minimum} \{ c_l \}$$

alors les colonnes de l'ensemble ρ peuvent être éliminées car dominées par la colonne $A_{\bullet r}$.

6.3 Approche de résolution

L'approche de résolution que nous proposons cherche d'abord la solution optimale de la relaxation linéaire (PRHL) de la formulation de recouvrement d'ensembles:

$$(PRHL) \qquad Minimiser \sum_{r \in R} c_r x_r$$

$$Sujet\ à \sum_{r \in R} a_{ir} x_r \geq 1 \qquad \forall s \in S$$

$$0 \leq x_r \leq 1 \qquad \forall r \in R.$$

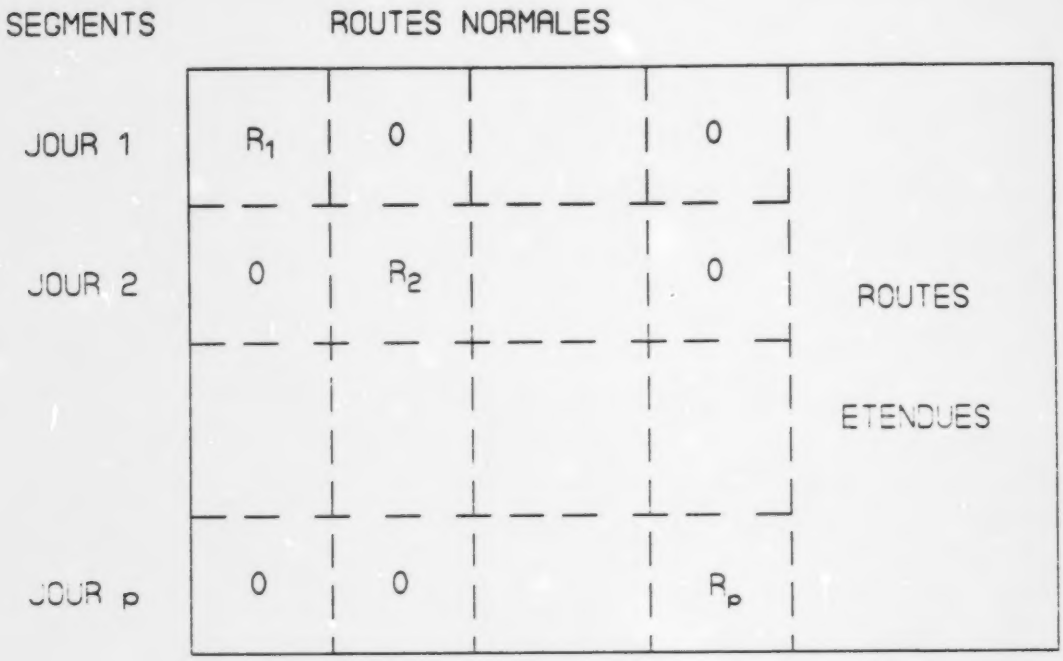


Figure 7. Structure de la matrice de contraintes

Pour résoudre le problème relaxé, nous proposons une approche de décomposition basée sur les observations suivantes concernant la structure du problème (voir figure 7):

- Les segments et les routes–horaires normales pour une période donnée forment un problème de recouvrement d'ensembles.
- Les sous-problèmes correspondant aux diverses périodes sont indépendants.
- Le nombre de routes légales normales est significativement inférieur à celui des routes étendues et on peut toutes les générer.
- Les routes–horaires étendues sont, en général, indésirables; elles ne sont utilisées que lorsqu'aucune alternative de recouvrement avec des routes normales n'existe.

L'algorithme peut alors s'écrire comme suit:

ETAPE 1

Pour $j = 1, ..., p$

Résoudre la relaxation linéaire (PRHL) du sous-problème de recouvrement pour la période j, en utilisant la matrice de contraintes A_j formée par les segments dans S_j et les routes-horaires dans R_j;

Soit R_j^* l'ensemble contenant les routes-horaires formant la solution optimale de ce problème et soit Π_j^* l'ensemble de multiplicateurs correspondant; $R^* = \bigcup_j R_j^*$ et $\Pi^* = (\Pi_1^* \ \Pi_2^* \ \cdots \ \Pi_p^*)^T$.

ETAPE 2

Si R^* couvre tous les segments dans S: STOP

Sinon

Soit $\bar{S}$ l'ensemble des segments non couverts par les routes dans R^*.

Générer, à l'aide du vecteur de multiplicateurs Π^*, des routes étendues, $\bar{R}$, couvrant les segments dans $\bar{S}$.

Réoptimiser le problème résultant: soit R^* l'ensemble contenant la solution optimale au problème relaxé.

ETAPE 3

Obtenir la solution entière, R^I, au problème (PRH), à partir de la solution continue R^*.

Examinons maintenant plus en détails certains points clés dans l'exécution de ces étapes.

6.4 Résolution du sous-problème

La résolution de la relaxation linéaire (PRHL) du sous-problème de recouvrement pour une période j, $j = 1, ..., p$, consiste à résoudre le modèle de programmation linéaire:

$$(PRHL) \qquad Minimiser \quad \sum_{r \in R_j} c_r x_r$$

$$Sujet\ à \quad \sum_{r \in R_j} a_{ir} x_r \geq 1 \qquad \forall s \in S_j$$

$$0 \leq x_r \leq 1 \qquad \forall r \in R$$

Avant d'entreprendre la résolution du problème, il faut s'assurer de sa réalisabilité. Des réductions de la matrice de contraintes A_j peuvent être également tentées à cette occasion.

Lorsqu'une ligne de la matrice A_j est égale au vecteur nul, le problème est clairement irréalisable: le segment $j \in S_j$ ne sera pas couvert par une des routes–horaires de l'ensemble R_j. Pour assurer la réalisabilité, on peut introduire une route "bidon", à très haut coût, recouvrant le segment. Alors, tant le segment que la route bidon peuvent être éliminés, d'après la règle de réduction 1. Nous préférons cependant garder cette route afin de faciliter la dernière phase de l'algorithme, l'introduction des routes–horaires étendues, où la route bidon sera éliminée. Jusque là, elle fera partie de la solution optimale du sous-problème.

Le problème résultant est réalisable. La première règle de réduction peut être alors appliquée à la matrice de contraintes correspondante. Si les dimensions de celle-ci le permettent, les règles 2 et 3 peuvent également être utilisées.

L'algorithme du simplexe peut être directement appliqué au problème résultant. La même solution optimale peut cependant être obtenue beaucoup plus efficacement, surtout pour des matrices A_j de grandes dimensions, en utilisant la procédure suivante:

ETAPE 1

Choisir un ensemble restreint, R_0 , de "bonnes" routes–horaires dans R_j recouvrant tous les segments dans S_j.

ETAPE 2

Résoudre le problème linéaire de recouvrement défini par R_0 et S_j.

ETAPE 3

Evaluer les coûts marginaux des autres routes–horaires (c.-à-d., appartenant à $R_j - R_0$); retenir toutes les routes–horaires dont le coût marginal est négatif et les joindre à R_0.

ETAPE 4

Continuer l'optimisation du problème élargi, à l'aide de l'algorithme du simplexe, jusqu'à l'obtention de l'optimum.

L'assertion d'efficacité de cette procédure se justifie par le fait qu'il est généralement plus facile de résoudre un problème de programmation linéaire de taille réduite. Or, le nombre

de routes–horaires et de segments étant habituellement élevé, la procédure vise à ne pas devoir tous les considérer.

Donc, si l'ensemble initial R_0 est restreint, l'étape 2 ne nécessite aucun effort particulier. Ainsi, selon le rapport relatif entre le nombre de segments et celui des routes, soit l'algorithme primal, soit la forme duale du simplexe, sera efficacement utilisé pour obtenir une première solution optimale restreinte.

D'un autre côté, si l'ensemble initial R_0 est "bon", c'est-à-dire s'il contient la plupart des routes–horaires qui apparaîtront dans la solution optimale, alors le nombre de routes n'appartenant pas à R_0 et ayant un coût marginal négatif devrait être petit, ce qui assure l'efficacité des étapes 3 et 4 de la procédure.

C'est donc la procédure de sélection de l'ensemble initial R_0, à l'étape 1, qui est la clé de cette approche. Plusieurs heuristiques sont possibles pour effectuer ce choix (jusqu'à ce que tous les segments soient couverts):

H1. Choisir la route–horaire avec le plus bas coût.

H2. Choisir la route–horaire avec le plus bas coût/segment.

H3. Choisir la route–horaire avec le plus bas coût par segment non encore couvert.

La procédure H3 est basée sur les travaux de Baker et col. (1979; voir aussi Baker, 1979 et Baker, Bodin et Fisher, 1980) et devrait, tant intuitivement que sur la base des résultats obtenus pour le problème des horaires des équipages d'avion, fournir les meilleurs résultats. Cette procédure exige cependant un tri à chacune de ses itérations. Alors, pour diminuer les temps d'exécution et puisque notre procédure, à la différence du problème dans l'aviation, s'inscrit dans un algorithme exact, une variante intéressante est:

H4. Choisir la route–horaire avec le plus bas coût/segment, sauf lorsque tous les segments la composant sont déjà couverts.

C'est cette dernière procédure que nous utilisons. Quant à la continuation de l'optimisation à l'étape 4, il s'agit d'une méthode usuelle de traitement post-optimal.

6.5 Autres considérations algorithmiques

Etant donné le vecteur Π^* de multiplicateurs optimaux, le coût marginal de toute route–horaire r se calcule selon la formule habituelle:

$$\overline{c}_r = c_r - \Pi^{*T} a_r$$

ce qui, dans le cas présent, se traduit par:

$$\overline{c}_r = c_r - \sum_{s \in \kappa_r} \pi_s^*$$

où π_s^* est le multiplicateur du simplexe associé au segment (contrainte) s, $s \in S$.

Il est donc très facile d'évaluer le coût marginal d'une route, si on connaît sa composition et la solution optimale courante du problème relaxé. Cette constatation nous permet de traiter efficacement les routes–horaires étendues, par des techniques de post optimisation et génération de colonnes. Par ailleurs, c'est cette approche qui justifie la conservation des routes bidon lors de la résolution des sous-problèmes (voir section 6.4): les coûts marginaux des segments non couverts par des routes–horaires normales sont directement disponibles pour les phases subséquentes. Remarquons que la même approche peut être également utilisée lors de la génération des routes–horaires normales avec retours.

De plus, le processus peut être exécuté en plusieurs étapes, en commençant avec des bornes plus strictes sur les coûts marginaux des routes acceptées; ces bornes sont ensuite graduellement amenées vers zéro. La justification d'une telle approche est encore le souci de choisir le plus petit ensemble de routes possible, contenant la solution optimale du problème relaxé. Un compromis entre le nombre d'itérations, donc de résolutions du problème relaxé, et celui des routes retenues doit être atteint par expérimentation.

Quant à l'obtention de la solution entière, à partir de la solution du problème relaxé, cela peut se faire de plusieurs façons. Si une solution optimale est recherchée, un algorithme d'énumération (''branch-and-bound'') est indiqué. Lorsqu'une très bonne solution est suffisante, nous utilisons une heuristique (Salkin, 1975; voir aussi Crainic et Rousseau, 1987) qui fournit, en général, des solutions extrêmement proches (moins de 1%) de l'optimum.

VII. EXPERIMENTATION ET VALIDATION

Les modèles et algorithmes présentés dans les sections précédentes ont été le sujet d'un programme d'expérimentation dont le but était double. Nous voulions tout d'abord vérifier la pertinence de ces modèles et procédures, par rapport au problème posé, en termes d'efficacité de résolution et de qualité des solutions obtenues. Nous désirions aussi identifier les points méthodologiques, concernant la modélisation, le développement algorithmique ou l'implantation informatique, qui nécessiteraient une continuation des recherches ou plus d'expérimentation.

Les données utilisées proviennent d'une entreprise de camionnage de charges partielles, dont le siège est au Québec et dont les opérations couvrent cette province plus une partie de l'Ontario (incluant Toronto) et une partie des Maritimes. Le réseau correspondant, et que nous avons utilisé pour notre expérimentation, est composé de 20 terminus, qui sont tous aussi des bases.

Nous n'avons pas pu obtenir les données de base du processus: les prévisions de demande ou le plan de transport. L'entreprise nous a cependant fourni l'ensemble des routes–horaires régulières qu'elle a opéré en 1988. Elle a également mis à notre disposition certains documents internes portant sur les mouvements réels des tracteurs pour les cinq jours d'une période de planification. Ces documents indiquent, entre autres, le jour et l'heure de départ de chacune des routes effectuées.

Les routes–horaires régulières effectuées par la compagnie étaient combinées et présentées en 79 *plans de travail* †, chacun couvrant les 5 jours de la période de planification. Nous signalons, par ailleurs, que nous proposons ce terme faute de connaître une équivalence "officielle" en français du terme *bids* couramment utilisé dans l'industrie du camionnage.

Le tableau 2 présente la distribution de ces plans de travail selon leur composition, tandis que le tableau 3 présente la même information pour les métaroutes qui les composent. Ce second tableau présente aussi pour chaque type de métaroute la fréquence d'apparition dans

† Par cohérence avec les définitions de la section III, le terme correct serait *métaplan de travail*. Toutefois, puisque le sens est nonambigu et afin de simplifier la présentation, nous préférons ne pas utiliser le préfixe "méta" dans ce contexte.

les plans de travail, ainsi que le nombre total d'occurrences (c.-à-d., le nombre correspondant de routes–horaires) pendant la période de planification.

Composition	Proportion
Métaroutes normales simples	62%
Métaroutes normales répétitives	13%
Métaroutes étendues	5%
Mixte	20%
Nombre total	79

Tableau 2. Distribution des plans de travail initiaux

Composition	Proportion	Fréquence dans plans de travail	Fréquence totale des routes
Normale simple	64%	73.3%	78.0%
Normale répétitive	18%	8.9%	15.6%
Etendue	16%	17.2%	6.4%
Nombre total	37	100%	378

Tableau 3. Distribution des métaroutes initiales

A l'examen des chiffres présentés dans ces deux tableaux, on remarque d'abord que l'entreprise essaie de limiter le nombre et l'utilisation des routes étendues: 5% des plans de travail sont formés de routes étendues et celles-ci ne forment que 6.4% de toutes les routes utilisées par la companie. Notons qu'une même route peut apparaître dans plusieurs plans de travail. C'est presque toujours le cas avec les routes étendues, ce qui explique l'apparente contradiction dans la distribution des routes étendues entre le tableau 2 et la colonne des *fréquences dans les plans de travail* du tableau 3.

Nous pouvons également remarquer que la majorité des plans de travail (80%) prévoit que le chauffeur effectue le même trajet à chacun de ses départs de la base. Il n'est pas clair si cette caractéristique découle d'une politique de la companie, des désirs des chauffeurs ou des limitations des méthodes manuelles de génération des routes–horaires régulières. Nous pensons qu'à des degrés divers, les trois facteurs ont joué. Il serait intéressant, dans une phase ultérieure du projet, d'examiner l'impact d'une telle politique sur le coût et la productivité des routes–horaires retenues.

La décomposition manuelle des plans de travail et métaroutes initiaux a généré 37 métaroutes, 54 métasegments et 886 segments. Le tableau 4 présente la distribution des métasegments selon l'occurrence dans l'ensemble des plans de travail initiaux. Le tableau indique aussi le nombre correspondant de segments générés.

Fréquence par période	Nombre de métasegments	Proportion	Nombre total de segments générés	Proportion
0 – 4	6	11%	24	2.71%
5 – 9	12	22%	66	7.45%
10 – 14	18	33%	184	20.77%
15 – 19	2	4%	30	3.39%
20 – 24	4	7%	88	9.93%
25 – 29	2	4%	50	5.64%
30 – 34	0	0%	0	0%
35 – 39	2	4%	72	8.13%
40 – 44	2	4%	80	9.03%
45 – 49	2	4%	90	10.16%
50 +	4	7%	202	22.80%
Total	54	100%	886	100%

Tableau 4. Distribution des métasegments et segments

Il est intéressant de noter que près de 90% des métasegments, représentant plus de 93% des segments, ont une fréquence de cinq départs ou plus par période de planification, ce qui

correspond à une occurrence par jour au minimum, si nous nous basons sur une période de cinq jours. Plus des deux tiers des métasegments (80% des segments) ont une occurrence minimale de deux fois par jour, alors qu'un tiers (70% des segments) a trois départs ou plus par jour. Il y a même un peu plus de 7% des métasegments qui ont une occurrence quotidienne d'au moins dix départs, engendrant ainsi près de 23% des segments. Par ailleurs, une majorité de métasegments (55%) ont entre un et trois départs par jour.

Nous connaissions, à partir des documents de la compagnie, les jours exacts de tous les départs. Nous avons donc cherché à vérifier l'hypothèse selon laquelle les occurrences d'un métasegment sont distribuées également entre les jours d'une période de planification. Or, nous avons pu constater, en examinant la liste quotidienne des départs et l'historique des mouvements réels des tracteurs, que la répartition "égale" des fréquences sur les cinq jours de la période était réelle à quelques rares exceptions près.

Ainsi, il est évident que les métasegments étendus, c'est-à-dire ceux qui nécessitent au moins un coucher hors base, ne seront en général pas effectués une fois par jour, mais plutôt une fois aux deux jours. Il est également possible, quoique rare, que les départs soient inégalement répartis entre les journées; ceci est surtout rencontré lorsqu'un métasegment a une fréquence très élevée ou très basse.

Il est donc correct d'utiliser une telle règle de distribution quotidienne des fréquences, lorsque des informations particulières ne sont pas disponibles. Pour notre expérimentation, nous avons cependant utilisé la distribution historique disponible à partir des documents de l'entreprise.

Deux ensembles de segments ont été générés à partir de ces données. Dans le premier, les temps de départ des segments sont ceux indiqués dans les documents de l'entreprise comme réellement effectués. Dans la suite de ce rapport, nous référons à cet ensemble sous le nom de *SC*.

Nous avons nous-mêmes généré les temps de départ des segments du second ensemble, que nous appellerons *SN*. Nous avons utilisé pour cela, une règle très simple, en trois points:

(i) déterminer pour chaque paire de terminus pour laquelle un métasegment existe, des bornes inférieure et supérieure sur les temps de départ, afin qu'une remorque soit prête pour le départ le plus tôt et afin d'assurer pour le départ le plus tardif une arrivée à

destination avant la fermeture des quais de chargement et déchargement;

(ii) distribuer uniformément entre ces deux bornes les départs des métasegments *non symétriques* (c'est-à-dire, pour lesquelles il n'existe pas de métasegment identique en sens inverse);

(iii) diviser en deux l'intervalle des départs pour les métasegments *symétriques*, et distribuer uniformément les départs dans un sens sur une des deux moitiés et les départs dans l'autre sens sur la deuxième moitié.

Problème		# segments	Nombre de routes normales				
Jour	Type de segments	Total Normaux	Sans retours	Avec retours	Total	Heuristique	Optimum entier
1	SC	178	4559	4453	9012	70	67
	SN	165	6275	2476	8751	71	64
2	SC	176	3336	4300	7636	67	63
	SN	164	5162	3063	8225	70	63
3	SC	175	5156	4782	9938	70	69
	SN	164	7919	5221	13140	66	66
4	SC	187	4734	7600	12334	74	69
	SN	178	10906	6063	16969	73	69
5	SC	170	3532	6028	9560	68	67
	SN	167	7551	3538	11089	69	68
Total	SC	886	21317	27163	48480	349	335
	SN	838	37813	20361	58174	349	330

Tableau 5. Nombre de routes normales générées et sélectionnées

Cette règle cherche à éviter que les départs en directions opposées entre deux terminus se fassent exactement à la même heure car, alors, dû aux durées des segments dans notre

application, plusieurs connexions ''naturelles'' ne peuvent se réaliser, même si les périodes de chevauchement sont très étendues. Même si la règle est assez simpliste et manque quelque peu de réalisme, les résultats obtenus sont très bons. Nous reviendrons sur ce sujet lors de l'analyse des routes et résultats obtenus.

A cause de leur trop longue durée, tel le segment "que – tor" d'une durée de conduite de onze heures, un petit nombre de segments (48, représentant 5.4% du total) ne permettent pas de former des routes–horaires normales. Ces segments doivent donc être couverts par des routes étendues qui sont normalement générées lors de la phase de post-optimisation de l'algorithme. Cependant, dans le cas présent, tous les segments étendus formaient des ''paires'' naturelles, générant des routes étendues de deux jours évidentes. Nous avons donc concentré nos efforts d'analyse sur les routes normales.

Le tableau 5 présente un résumé des résultats des diverses procédures relatives à la génération et à la sélection des routes–horaires régulières. Dans la colonne # *segments* nous avons indiqué, pour chaque jour, le nombre total de segments obtenus à partir des plans de travail de la compagnie (dans les lignes *SN*), ainsi que le nombre de segments *normaux* utilisés lors de la génération des routes (dans les lignes *SC*), indépendamment de l'ensemble de segments considéré lors de la génération. Les différences entre ces deux chiffres représentent le nombre de segments exigeant la formation de routes–horaires étendues.

En examinant les chiffres du tableau 5, on peut remarquer le nombre étonnamment bas de routes–horaires normales légales qui sont générées, ce qui constitue une différence marquée avec le problème équivalent dans l'aviation. Ce fait s'explique toutefois facilement lorsqu'on note, qu'à la différence du problème des horaires des pilotes, la plupart des métasegments formant les routes–horaires dans le camionnage de charges partielles ont des longues durées, comparativement à la durée maximale de travail. Cela garantit que le nombre de routes normales (et des routes partielles) est limité et que toutes peuvent être générées sans difficultés.

Le phénomème mentionné au paragraphe précédent est aussi apparent dans le tableau 6, qui présente une distribution des routes–horaires générées à partir des segments de l'ensemble *SN*, selon le nombre de segments les composant. En effet, on peut observer que la composition de plus de 99% des routes générées a quatre segments ou moins, avec près de 95% des

routes couvrant exactement ce nombre.

Le même tableau indique également le nombre de routes–horaires dont la composition comprend un "nu". Notons que l'occurrence de telles routes est faible, 12.5% du nombre total de routes, et que généralement les essais de construire des routes–horaires couvrant beaucoup de segments mènent à des routes comportant des "nus".

Jour	Type	Nombre de segments par route				
		2	4	6	8	Total
1	sans nu	404	7135			7539
	avec nu	81	1089	38	4	1212
	total	485	8224	38	4	8751
2	sans nu	366	6482	32		6880
	avec nu	76	925	257	87	1345
	total	442	7407	289	87	8225
3	sans nu	438	11326			11764
	avec nu	77	1291	4	4	1376
	total	515	12617	4	4	13140
4	sans nu	467	14711			15178
	avec nu	87	1662	38	4	1791
	total	554	16373	38	4	16969
5	sans nu	430	9121			9551
	avec nu	80	1416	38	4	1538
	total	510	10537	38	4	11089
Total	sans nu	2105	48775	32		50912
	avec nu	401	6383	375	103	7262
	total	2506	55158	407	103	58174

Tableau 6. Distribution des routes–horaires générées

Dans la colonne *Heuristique* du tableau 5, nous avons indiqué le nombre de routes–horaires sélectionnées par la procédure heuristique présentée à la section 6.4. Il est intéressant de noter le faible nombre de ces routes, ce qui assure une résolution très efficace du problème linéaire. Aux étapes subséquentes, l'application du critère des coûts marginaux négatifs fera en sorte qu'au plus la moitié des autres routes–horaires seront sélectionnées. Ce nombre peut être réduit en appliquant la procédure indiquée à la section 6.5.

Concernant ce dernier point, on note l'influence des paramètres d'exécution du programme de programmation linéaire (nous utilisons le programme XLP du logiciel XMP; voir XMP, 1987 ou Marsten, 1981), sur les solutions obtenues. A titre d'exemple, nous présentons dans le tableau 7 les valeurs des solutions aux problèmes de recouvrement (''P.L.'' : solution de la relaxation linéaire; ''Arr.'' : solution entière arrondie; ''Opt.'' : solution optimale entière) pour trois valeurs de la *fréquence de re-factorisation* de la base du programme linéaire utilisée par le logiciel.

L'examen des valeurs présentées dans ce tableau révèle que la composition de l'ensemble optimal de routes–horaires choisi par le programme linéaire varie selon la valeur de la fréquence de re-factorisation. En effet, le problème a un nombre élévé de solutions multiples, à cause de la structure des formules de coût et de productivité qu'il incorpore. Ce nombre est encore plus important dans le cas de la relaxation linéaire. Deux solutions optimales multiples pour le problème linéaire n'engendrent toutefois pas nécessairement deux solutions entières multiples. Or, il semble que ce soit exactement le phénomène produit par la variation de la fréquence de re-factorisation. Les variations observées dans les valeurs des solutions entières ne sont pas très élevées, mais peuvent entraîner des différences dans le nombre de chauffeurs requis par les routes retenues.

Nous prévoyons donc conduire une analyse en profondeur de ce phénomène, afin d'en déterminer la causalité et essayer d'en tirer parti lors de la résolution du problème. D'un autre côté, il est intéressant de noter que la résolution du problème relaxé offre une très bonne borne inférieure sur la solution optimale du problème original. Nous avons même observé un cas (jour 1) où la solution de la relaxation était aussi optimale pour le problème entier.

On trouve dans la colonne *Optimum entier* du tableau 5, le nombre de routes–horaires retenues dans la solution optimale du problème de recouvrement d'ensembles. Notons que ce

Jour	Facteur = 50			Facteur = 100			Facteur = 120		
	P.L.	Arr.	Opt.	P.L.	Arr.	Opt.	P.L.	Arr.	Opt.
1	-	-	-	110.41	110.41	110.41	110.41	110.41	110.41
2	106.23	106.23	106.23	106.23	160.73	115.73	106.23	113.23	107.73
3	107.38	166.63	112.63	107.38	156.13	110.13	107.38	161.13	113.63
4	-	-	-	116.83	168.58	120.58	116.83	169.08	120.58
5	110.69	163.31	116.06	110.69	175.06	114.06	110.69	178.81	119.06

Tableau 7. Valeurs des objectifs et fréquences de re-factorisation

nombre est inférieur à celui des routes séléctionnées par l'heuristique, et que plusieurs parmi ces dernières ont été remplacées lors des phases de post-optimisation.

La répartition des routes–horaires sélectionnées selon la composition se retrouve au tableau 8. On y observe que la grande majorité des routes retenues présente la caractéristique de contenir peu de segments dans leur composition: 35.15% des routes sont composées de quatre segments, tandis que 63.3% d'entre elles sont composées de deux segments seulement. Par ailleurs, le nombre de routes–horaires comportant un ''nu'' est extrêmement réduit, représentant seulement 1.2% du total. Ces résultats sont obtenus en utilisant les segments *SN*. Les résultats obtenus à partir de l'ensemble *SC* sont équivalents.

Examinons maintenant la couverture obtenue à l'aide de ces routes–horaires. La plupart des segments (92.72% dans le cas de l'ensemble *SN*) sont recouverts une fois seulement. Les segments surcouverts, même s'ils ne représentent qu'une faible proportion de l'ensemble (6.32% sont recouverts deux fois et 0.95% sont recouverts trois fois), correspondent à des ''nus'', mouvements non-productifs et donc à éviter. Nous avons donc cherché à expliquer et à enrayer ce phénomène.

Plusieurs causes combinent leurs effets pour donner naissance au phénomène de la surcouverture. Premièrement, ni la fonction de coût ''réel'', ni celle basée sur la productivité, ne peut mesurer adéquatement l'impact des ''nus'' signalés par une surcouverture. En effet, un ''nu'' introduit dans une route lors de la génération, peut être détecté et les mesures de coût

sont alors ajustées en conséquence. Entre autres, le temps de conduite associé à ce segment n'est pas considéré comme du temps productif. Mais, puisqu'on ne connaît pas avant l'obtention de la solution optimale quels segments seront surcouverts et à quel degré, il n'y a pas de façon efficace d'ajuster le coût des routes afin de tenir compte de ce phénomène et de l'éviter lors de l'optimisation.

Jour	Type	Nombre de segments par route				
		2	4	6	8	Total
1	sans nu	43	20			63
	avec nu			1		1
2	sans nu	41	21	1		63
	avec nu					0
3	sans nu	41	24			65
	avec nu			1		1
4	sans nu	43	25			68
	avec nu			1		1
5	sans nu	41	26			67
	avec nu			1		68
Total	sans nu	209	116	1		326
	avec nu			4		4
Total		209	116	5	0	330

Tableau 8. Composition des routes–horaires optimales

Les règles d'attribution des temps de départ des segments que nous avons utilisées pour cette expérimentation forment une seconde cause de la surcouverture. En effet, dans le cas des métasegments symétriques, l'application de ces règles implique que toutes les routes dans un des deux sens partent avant toutes celles dans l'autre sens, chaque direction utilisant la moitié

de l'intervalle de temps prévu. Or, cette politique fait que certains segments, surtout ceux aux extrémités des intervalles, ne peuvent faire de connexions légales et requièrent des ''nus''. Ce phénomème est clairement présenté au tableau 9, où les chiffres entre parenthèses indiquent combien de segments sont couverts trois fois. Il est évident toutefois, que l'utilisation de règles plus réalistes, ou même une inspection rapide des routes choisies, permettrait des améliorations importantes. Nous avons ainsi, par inspection et ajustement manuel, facilement réduit de 41% le nombre de segments surcouverts du tableau 9.

Route	Durée	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4	Jour 5	Total
"mtl – que"	3.50	3 (1)		2	2	1	8
"que – mtl"	3.50		2 (1)	4		2	8
"mtl – brk"	2.25	1		2	2	3 (2)	8
"brk – mtl"	2.25			2	2	4 (2)	8
"mtl – ott"	2.50			1			1
"ott – mtl"	2.50				1		1
"mtl – trv"	2.25		2	3	3 (1)	3	11
"trv – mtl"	2.25		2	4	1	4 (1)	11
"que – chc"	3.25		1				1
"chc – que"	3.25					1	1
"tor – ham"	1.00	1			1	1	3
Total		5	7	18	12	19	61

Tableau 9. Distribution des segments surcouverts

Ajoutons que dans certaines situations, une surcouverture de certains segments est nécessaire pour assurer la réalisabilité du problème. Un tel cas se présente, par exemple, lorsqu'il y a un débalancement marqué entre les fréquences des déplacements opposés entre deux terminus. Nos données présentaient cette caractéristique.

Notons finalement que plusieurs avenues s'offrent à nous pour diminuer la surcouverture des segments. Une première alternative consiste à résoudre une série de problèmes de recouvrement, chaque problème, sauf le premier, ajoutant à son objectif un terme pénalisant la

surcouverture observée dans la solution du problème précédent. Une seconde avenue tire profit de l'existence de solutions multiples, donc avec la même valeur pour l'objectif, qui présentent des caractéristiques de couverture différentes. Il est possible alors de construire une procédure qui, par pivots successifs, examine de telles solutions et choisit celle qui offre la meilleure couverture. Finalement, une interface interactive-graphique permettrait à l'usager, qui par définition connaît bien son problème, d'effectuer manuellement les ajustements nécessaires.

Nos recherches, dans le cadre du présent projet, ne portaient pas sur ces aspects du problème. Nous prévoyons cependant les inclure dans la prochaine phase de nos travaux, surtout les deux dernières approches qui s'harmoniseraient très bien à l'intérieur d'un outil intégré de planification.

Lorsqu'on compare les résultats obtenus, en utilisant nos modèles et procédures, à ceux correspondant aux plans de travail utilisés par la compagnie, les conclusions sont extrêmement encourageantes, tel qu'illustré au tableau 10.

Critère	Segments *SC*	Segments *SN*	Segments *SN* ajustés
Salaires	+ 8.1%	+ 4.6%	+ 0.08%
Productivité	– 13,11%	– 15.57%	– 17.05%
# de routes	– 11.60%	– 12.92%	– 12.92%
# de tracteurs	– 8.21%	– 9.58%	– 9.58%

Tableau 10. Comparaisons de quelques mesures de productivité

Lorsque nous examinons les routes–horaires retenues et les comparons à celles composant les plans de travail de la compagnie, nous observons que beaucoup de routes se retrouvent dans les trois ensembles. Ceci est tout-à-fait naturel, puisque les segments de l'ensemble *SC* sont directement extraits des routes utilisées par l'entreprise, tandis que pour ceux de l'ensemble *SN* seulement les heures de départ diffèrent. Ce sont d'ailleurs les routes du premier ensemble qui présentent le plus de similitudes avec celles utilisées.

Nous observons toutefois, que l'application de la méthodologie que nous proposons a entraîné, dans tous les cas, une recherche de routes plus productives, plus efficaces, utilisant mieux le temps disponible dans une période de travail. Ainsi, par exemple, les routes "mtl – trv – mtl" et "trv – mtl – trv" ont été combinées pour ne former que la route répétitive "mtl – trv – mtl – trv – mtl".

Cette recherche de l'efficacité se traduit par des gains appréciables dans plusieurs mesures de productivité. Le tableau 10 présente ces résultats, où les valeurs associées aux solutions que nous avons obtenues à partir des deux ensembles de segments sont comparées aux mesures correspondantes pour les routes utilisées dans les plans de travail de l'entreprise. Nous remarquons particulièrement la diminution marquée du ''coût'' de productivité, ce qui se traduit par des diminutions sensibles du nombre de routes–horaires, et donc du nombre de chauffeurs et de tracteurs requis. Evidemment, nous observons des gains plus importants, dans toutes les mesures de productivité, lorsque nous avons plus de liberté à fixer les heures de départ des segments.

Concernant l'évaluation ''monétaire'' des solutions obtenues, les premiers résultats, sans être mauvais, ne sont pas vraiment intéressants. Nous avons donc examiné les solutions et avons constaté que c'est la surcouverture des segments qui cause le problème. Nous avons donc ajusté les résultats (dernière colonne du tableau 10) pour tenir compte de la diminution de la surcouverture obtenue, tel que mentionné précédemment, par inspection manuelle. Les résultats sont maintenant extrêmement satisfaisants et indiquent qu'une procédure plus sophistiquée de traitement des cas de surcouverture des segments entraînera, pour les routes–horaires proposées, une diminution sensible du coût, et une augmentation encore plus marquée de leur efficacité.

Notons, par ailleurs, que tout gain de productivité obtenu au niveau des routes–horaires régulières entraîne aussi des améliorations dans l'utilisation du matériel, surtout les tracteurs, contribuant ainsi à une meilleure performance des opérations de l'entreprise. Donc, les gains importants de productivité, déjà obtenus par l'intermédiaire des solutions actuelles, soulignent l'intérêt de celles-ci et démontrent le succès de l'approche que nous proposons.

VIII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons atteint notre but de développer une méthodologie efficace pour traiter le problème de l'établissement des routes–horaires régulières pour le camionnage de charges partielles.

L'approche que nous proposons est générale, flexible et adaptable. Les résultats obtenus indiquent que des gains très intéressants peuvent être obtenus, en appliquant cette méthodologie au niveau de la productivité, de l'efficacité et du coût des routes utilisées. Ces gains se traduisent directement dans une utilisation plus efficace des ressources humaines et de l'équipement routier, donc dans une efficacité accrue des opérations de l'entreprise.

Certains points mériteraient cependant des recherches additionnelles:

- développer une fonction de coût pour les routes–horaires qui reflète à la fois leurs caractéristiques économiques et celles de productivité;
- rechercher une procédure plus sophistiquée pour l'attribution des heures de départ des segments;
- développer des procédures automatiques pour détecter et remédier aux cas de surcouverture des segments;
- analyser plus attentivement les impacts des paramètres d'exécution des procédures informatiques sur la qualité des résultats;
- explorer d'autres approches de modélisation (un exemple d'une telle approche est présenté à l'annexe A).

Tous ces sujets présentent un intérêt certain, tant du point de vue théorique que pratique. Cependant, le complément naturel à la méthodologie présentée dans ce rapport est la construction d'un système interactif-graphique qui permettrait à l'usager d'interagir avec le système, de facilement utiliser les modèles et procédures de recherche opérationnelle le composant, de diriger le processus de recherche des solutions, de spécifier des choix et d'indiquer des alternatives. Cela assurerait aussi une intégration plus rapide et efficace de la méthodologie au sein des entreprises et contribuerait à l'essor et à l'accroissement de l'efficacité et de la compétitivité de l'industrie du transport routier de charges partielles.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Madame Lucie Bibeau, programmeur-analyste au Centre de recherche sur les transports, pour son excellent travail dans le cadre de ce projet. Nous voulons aussi féliciter Monsieur Alain Blanchette pour son succès lors de ses activités avec l'industrie. Ce projet a été rendu possible grâce à une subvention du programme des "Actions concertées sur le transport des marchandises" du fonds F.C.A.R. et du Ministère des Transports du Québec. Le financement supplémentaire est venu des subventions pour dépenses courantes C.R.S.N.G. des chercheurs principaux et d'une subvention spéciale de la Fondation de l'Université du Québec à Montréal.

BIBLIOGRAPHIE

Baker E. (1979), *Efficient Heuristic Solutions for an Airline Crew Scheduling Problem*, D.B.A. Thesis, University of Maryland, College Park, Maryland, U.S.A.

Baker E., Bodin L.D., Finnegan W. et Ponder R. (1979), *Efficient Heuristic Solutions to an Airline Crew Scheduling Problem*, **AIIE Transactions** 11 (2).

Baker E., Bodin L.D. et Fisher M. (1979), *The Development and Implementation of a Heuristic Set Covering Based System for Air Crew Scheduling*, working paper 80-015, University of Maryland, College Park, Maryland, U.S.A.

Blanchette A. (1989), *Etablissement des routes et horaires réguliers dans les entreprises de transport routier des marchandises*, mémoire M.B.A. – recherche, département des Sciences administratives, Université du Québec à Montréal.

Crainic T.G. (1982), *Un modèle de planification tactique pour le transport ferroviaire des marchandises*, thèse de doctorat, Publication #247, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

Bookbinder J.H. (1988) *La planification des stocks et des transports dans la distribution des papiers fins*, **Applications: la Rencontre Université – Industrie**, *3ème Journée Francophone sur la logistique et les transports*, Montréal, 19 décembre.

Crainic T.G. et Rousseau J.-M. (1986), *Multimode, Multicommodity Freight Transportation: A General Modelling and Algorithmic Framework for the Service Network Design Problem*, **Transportation Research B** 20(3), 225-242.

Crainic T.G. et Rousseau J.-M. (1987), *The Column Generation Principle and the Airline Crew Scheduling Problem* , **INFOR** 25 (2), 136-151.

Crainic T.G. et Roy J. (1988), *O.R. Tools for Tactical Freight Transportation Planning*, **European Journal of Operations Research** 33 (3), 290-297.

Crainic T.G., Roy J. et Delorme L. (1988), *Design of Driver Rcutes in the LTL Motor Carrier Industry*, congrès conjoint **TIMS XXVIII/EURO IX**, Paris, 6-8 juillet.

Desrochers M. (1986), *La fabrication d'horaires de travail pour les conducteurs d'autobus par une méthode de génération de colonnes*, thèse de doctorat, Publication #470, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

Garfinkel R.S. et Nemhauser G.L. (1972), *Integer Programming*, John Wiley & Sons.

Lavoie S., Minoux M. et Odier E. (1985), *A New Approach of Crew Pairing Problems by Column Generation and Application to Air Transports*, Publication #439, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

Marsten R.E. (1981), *The Design of the XMP Linear Programming Library*, **Transactions on Mathematical Software** 7 (4).

Mondou J.-F. (1989), *Mise au point d'un système interactif-graphique pour la planification tactique du transport des marchandises*, mémoire de maîtrise, département d'Informatique et

recherche opérationnelle, Université de Montréal.

Mondou J.-F., Crainic T.G. et Nguyen S. (1989), *Shortest Paths Revisited: The Impact of the C Programming Language on Efficiency*, **CORS/TIMS/ORSA Joint National Meeting**, Vancouver, 8-10 mai.

Rousseau J.-M. (1984), *Crew Scheduling Methods in the Operation and Planning of Transportation Systems*, in *Transportation Planning Models*, M. Florian (éditeur), 439-474, North-Holland.

Roy J. et Delorme L. (1989), *NETPLAN: A Network Optimization Model for Tactical Planning in the Less-than-Truckload Motor-Carrier Industry*, **INFOR** 27 (1), 22-35.

Salkin H.M. (1975), *Integer Programming*, Addison-Wesley.

XMP (1987), *XLP Technical Reference Manual*, XMP Software Inc., Tucson, Arizona, U.S.A.

ANNEXE A. LES METAROUTES

Il est intéressant, tant du point de vue théorique que pratique, d'examiner le problème de l'établissement des routes–horaires sans la dimension temporelle. Il s'agit alors de déterminer l'ensemble des métaroutes qui recouvrent tous les métasegments utilisés par les services du plan de transport et ce, au moindre coût.

L'intérêt de cette démarche provient essentiellement d'un ensemble d'observations concernant les temps de départ des routes et segments. En effet, les temps de départ qui sont associés aux routes spécifiées dans les plans de travail opérés par la compagnie sont rarement des instants déterminés avec précision et fixés pour la durée d'application du plan de transport. Les chauffeurs connaissent plutôt un intervalle, une *plage* de départ, dont l'amplitude est généralement assez importante, de l'ordre des quatre heures, ou même plus. Cette plage est d'ailleurs la même pour tous les chauffeurs qui opèrent la même route, le même jour, les instants précis de départ étant déterminés chaque soir, lors de la répartition, au gré des circonstances particulières de la journée. Attribuer, dans ce contexte, des heures de départ fixes aux segments et aux routes, constitue donc une entreprise qui peut présenter des risques, d'autant plus que, d'autre part, ces temps de départ peuvent entraîner une surcouverture de certains segments.

Pour tenir compte de ces phénomènes, nous avons introduit dans nos procédures le facteur de chevauchement, décrit à la section V, et avons proposé plusieurs approches pour traiter le problème de la surcouverture. Cette approche donne des résultats tout à fait satisfaisants, tel que montré à la section VII.

On peut espérer toutefois que considérer le problème directement au niveau des métaroutes peut éviter ou, au moins, alléger certaines de ces difficultés, puisque l'attribution des heures de départ semble être un problème plus opérationnel que tactique, qui a à être traité lors de l'exécution du plan de travail. Il serait d'ailleurs extrêmement intéressant de comparer le type des routes–horaires et celui des métaroutes générées.

Nous croyons également qu'aborder le problème de cette façon aurait des effets bénéfiques sur d'autres aspects de la planification des opérations de l'entreprise. Ainsi, le facteur temporel n'étant pas présent, une liste de métaroutes "intéressantes" peut être dressée à l'avance, en prévision des demandes particulières et des cas spéciaux qui ne manquent jamais

de venir compliquer l'exécution des plans les mieux établis. La construction de plans de travail hebdomadaires peut aussi être facilitée par cette approche (voir l'annexe B).

Nous ne prétendons pas dans cette annexe, analyser complètement le problème, ni en proposer des algorithmes de résolution pleinement développés ou testés. Nous nous proposons plutôt d'explorer le problème afin de dégager certaines de ses propriétés et quelques avenues que nous estimons les plus prometteuses pour sa résolution. Nous envisageons de consacrer une partie significative d'une deuxième phase du projet à poursuivre ces avenues.

A.1 Le modèle

Rappelons d'abord quelques définitions et éléments de notation.

A la section III, nous avons défini un *métasegment* comme une liaison entre deux noeuds du réseau qui, d'après les règles et politiques de la compagnie, peut être effectuée sans opération intermédiaire. Un tel métasegment n'a aucune caractéristique temporelle et toute la discussion de cette annexe est certainement correcte dans ce contexte.

La compréhension de ce qui suit peut cependant être accrue si on imagine que chaque métasegment a un attribut qui spécifie pour quelle journée il doit être couvert. Ainsi, si une certaine liaison doit être assurée quotidiennement, cinq métasegments, avec le même parcours, seront considérés. Les avantages de cette définition apparaissent encore plus clairement lorsqu'on considère qu'il y a des liaisons qui ne sont pas assurées chaque jour avec la même fréquence. Il est plus facile (ainsi que nous l'avons vu à la section VII) de distribuer les fréquences des services entre les journées de la période de planification, que d'introduire une batterie complète de tests de réalisabilité dans les procédures de génération et sélection des métaroutes et des plans de travail. Par ailleurs, il n'y a toujours aucune heure de départ associée avec un métasegment.

La fréquence f_s du métasegment s, $s \in \Sigma$, représente le nombre de fois que le métasegment est utilisé par tous les services du plan de transport. Une métaroute r, $r \in \Omega$, a un coût c_r et est composée d'une suite de métasegments et, éventuellement, de périodes de repos hors base.

Réécrivons κ_r, la composition de la métaroute r, comme un vecteur $a_r = (a_{sr})$, de dimension $(1 \times |\Sigma|)$, où a_{sr} représente le nombre de fois que le métasegment s, $s \in \Sigma$, apparaît dans la composition de la métaroute r, $r \in \Omega$.

Nous tenons ainsi compte des métaroutes répétitives. Notons que la caractéristique "jour d'opération" des métasegments facilite la spécification et réduit la valeur des coefficients a_{sr}. Evidemment, $a_r \geq 0$.

Soit x_r le nombre de fois que la route r, $r \in \Omega$, est parcourue. Le modèle du choix optimal des métaroutes s'écrit alors:

$$(PMR) \quad \textit{Minimiser} \quad \sum_{r \in \Omega} c_r x_r$$

$$\textit{Sujet à} \quad \sum_{r \in \Omega} a_{sr}\, x_r \geq f_s \qquad \forall \quad s \in \Sigma$$

$$0 \leq x_r \leq u_r \qquad \textit{et entier}$$

où les bornes supérieures sur les valeurs des variables représentent le nombre maximum de fois qu'une métaroute peut être choisie. Donc, étant donné la dernière définition des métasegments, elles sont égales au nombre de chauffeurs disponibles pour chaque période. Des limites plus strictes peuvent, éventuellement, être imposées sur la fréquence de certaines routes, telles les métaroutes étendues.

Le modèle présente encore une structure "proche" de celle des formulations classiques de recouvrement d'ensembles. Des règles de réduction de la matrice de contraintes, inspirées de celles utilisées pour ces modèles (voir, entre autres, Salkin, 1975 et Garfinkel et Nemhauser, 1972) peuvent donc être déduites.

A.2 Règles de réduction

Soit A la matrice de contraintes du modèle, $A_{i\bullet}$ la ligne i, $i = 1,...,|\Sigma|$, de A et $A_{j\bullet}$ la colonne j, $j = 1,...,|\Omega|$, de A.

Règle 1

Si $A_{i\bullet} = \alpha\, e_r$ pour un i et un r quelconques, où e_r est le vecteur unitaire d'ordre r et de dimension $(1 \times |\Omega|)$ et α est une constante positive quelconque, alors $x_r = \lceil f_i / \alpha \rceil$

dans toute solution réalisable et la ligne $A_{i\bullet}$ peut être éliminée. De plus, toutes les lignes $A_{\bullet l}$ telles que $a_{lr} \neq 0$ et $a_{lr}\, x_r \geq f_l$ peuvent être aussi éliminées. La fréqeunce de tous les métasegments l tels que $a_{lr} \neq 0$ doit être également ajustée: $f_l = f_l - x_r$.

Justification

Le métasegment i ne peut être couvert sans la métaroute r. Après l'élimination de la colonne $A_{\bullet r}$, on doit ajuster la valeur des fréquences de tous les métasegments contenus dans la route r et on peut éliminer les lignes dont le membre droit devient ainsi négatif ou nul.

Règle 2

Si $A_{i\bullet} \geq A_{\bullet l}$ et $f_i \geq f_l$, pour un i et un l donnés, alors la ligne $A_{\bullet l}$ peut être éliminée.

Justification

Si $a_{ir} \geq a_{lr}$ pour tout r et $f_i \geq f_l$, alors toute couverture de la ligne $A_{i\bullet}$ satisfait aussi la couverture du métasegment l. La ligne $A_{\bullet l}$ est alors *dominée* par la ligne $A_{i\bullet}$.

Règle 3

Si pour un ensemble de colonnes $R(k)$ et une colonne k, nous avons

$$\sum_{h \in R(k)} A_{\bullet h} \geq A_{\bullet k} \qquad \text{et} \qquad \sum_{h \in R(k)} c_h \leq c_k,$$

alors la colonne $A_{\bullet h}$ peut être éliminée.

Justification

Supposons une solution optimale, R^*, où $x_k^* \neq 0$.

Construisons une nouvelle solution $\overline{R}$, où $\overline{x}_k = 0$ et $\overline{x}_h = x_h^* + \alpha_h$. Les valeurs $\alpha_h \leq x_k^*$ représentent la partie de la couverture des métasegments, formant chaque métaroute h, assurée par la route k dans la solution R^*. Alors

$$\overline{Z} = Z^* - c_k\, x_k^* + \sum_{h \in R(k)} c_h\, \alpha_h$$

$$\text{Or} \qquad \sum_{h \in R(k)} c_h\, \alpha_h - c_k\, x_k^* \leq \sum_{h \in R(k)} c_h\, x_k^* - c_k\, x_k^* = \sum_{h \in R(k)} c_h - c_k \leq 0 \ .$$

Notons que la dernière règle est vraie pour toute cardinalité de l'ensemble $h \in R(k)$, mais que son coût d'application en terme de temps et effort de calcul, croît très rapidement avec cette cardinalité. D'un autre côté, des critères d'élimination basés sur cette règle, avec cardinalité 1 et 2, peuvent avantageusement être inclus dans des procédures de chaînage générant des métaroutes avec et sans retours.

A.3 Approches algorithmiques

Le nombre de métaroutes légales devrait être relativement restreint, surtout lorsqu'on travaille avec la définition des métasegments présentée à la section A.1, et leur génération ne devrait pas poser de problèmes particuliers. Une approche, qui est à la fois "évidente" et assurée de réussir, est alors la suivante:

(1) Générer l'ensemble des métaroutes légales.

(2) Appliquer, éventuellement, des règles de réduction à la matrice des contraintes.

(3) Résoudre la relaxation linéaire du modèle (*PMR*).

(4) Si la solution optimale du problème relaxé n'est pas entière, obtenir une telle solution en utilisant, par exemple, une approche d'énumération implicite.

Remarquons que les trois premières étapes de cette méthode peuvent être incorporées dans une approche de génération progressive de colonnes, où on débute par la génération des métaroutes normales sans retours, suivie par celle des routes normales avec retours et de celles des métaroutes étendues. Cette approche est similaire à celle exposée à la section 6.5, où le coût marginal d'une métaroute se traduit par:

$$\overline{c}_r = c_r - \sum_{s \in \kappa_r} \pi_s^* a_{sr}.$$

ANNEXE B. LES PLANS DE TRAVAIL

L'étape subséquente à l'obtention de l'ensemble optimal de métaroutes (ou de routes–horaires) consiste dans l'agencement de celle-ci en plans de travail. En effet, dans la plupart des entreprises, les chauffeurs ne choisissent pas parmi un ensemble de routes, mais choisissent un plan qui spécifie leur charge de travail pour toute la longueur de la période de planification et qui se répète à chaque période.

Nous présentons ici quelques considérations générales concernant ce problème. Celles-ci guideront nos travaux ultérieurs sur le sujet.

Un plan de travail est une suite légale de routes et de périodes de repos. La légalité d'un plan de travail est déterminée par des considérations de durée: temps total de disponibilité, durée totale de conduite, quantité de conduite en temps supplémentaire, etc. Des notions de coût et de productivité, similaires à celles exposées pour les routes (section 5.1), peuvent aussi être définies pour les plans de travail.

Le problème de la construction de l'ensemble optimal de plans de travail peut alors s'énoncer comme celui de la génération et de la sélection d'un nombre de plans légaux qui couvrent tous les segments (ou toutes les fréquences des métasegments) au moindre ''coût''.

Il est clair que ce problème peut être considéré comme une extension de celui du choix optimal de l'ensemble de routes–horaires présenté dans ce rapport. En particulier, l'approche de modélisation et de résolution proposée aux sections V et VI peut être étendue au cas des plans de travail.

Nous tenons cependant à faire remarquer que ce problème a une structure qui se prête bien à une approche de résolution utilisant la génération de colonnes par un algorithme de chemin le plus court, encore plus lorsqu'on utilise les métaroutes et la définition des métasegments proposée à l'annexe A.

En effet, il est assez facile de voir que, si on construit un réseau dont les noeuds correspondent aux métaroutes et les liens aux enchaînements possibles de celles-ci, l'ensemble de chemins dans ce réseau est le même que celui des plans de travail.

De plus, les règles de légalité touchant les diverses durées impliquées dans un plan de travail, nous fournissent facilement des définitions pour les *états* possibles pour les enchaînements partiels. Par exemple, si le temps supplémentaire dépasse une certaine valeur, dans les journées déjà incluses dans le plan, alors le temps de conduite des autres journées doit être moins que l'amplitude normale. De façon similaire, lorsque le temps total de disponibilité ou de conduite dépasse certaine limite, le plan doit prévoir deux périodes de repos.

Le nombre de ces états est limité. Nous pouvons donc construire un deuxième graphe, étendu, en copiant chaque noeud du graphe précédent et en lui associant un des états. Les liens de ce nouveau graphe représentent toujours des enchaînements légaux des métaroutes, où la légalité est aussi vérifiée par rapport à l'état des métaroutes. Donc, puisque chaque noeud correspond maintenant à une route, avec une caractérisation de ses durées, et que la légalité des enchaînements est vérifiée lors de la construction du graphe étendu, l'ensemble de tous les chemins dans ce graphe est le même que celui de tous les plans légaux de travail.

L'approche de résolution par génération de colonnes peut alors être appliquée, les variables étant générées par un algorithme de chemin le plus court dans le graphe étendu.

Plusieurs détails théoriques et pratiques doivent encore être résolus. En particulier, les problèmes reliés à la définition du "coût" d'un plan de travail et ceux concernant la surcouverture des segments devront être examinés. Il sera aussi important de développer une procédure efficace pour le calcul des coûts sur le graphe étendu et pour celui du chemin le plus court. Les travaux de Mondou (1989) et de Mondou, Crainic et Nguyen (1989) serviront de point de départ pour ce second problème.

Nous estimons toutefois que l'approche méthodologique, esquissée ici, pourra efficacement assister la résolution du problème des plans de travail dans le camionnage de LTL. Mentionnons, finalement, que les modèles et algorithmes développés pour ce problème trouveraient un complément parfait dans les possibilités offertes par une interface interactive-graphique. Nous prévoyons donc mettre au point un tel système, intégrant les outils nécessaires à la résolution à la fois du problème des routes–horaires régulières et de celui des plans de travail dans l'industrie du camionnage de charges partielles.

ANNEXE C. GENERATION DES ROUTES NORMALES

Nous présentons l'algorithme de génération des routes normales, exposé à la section 5.2. Sont considérés ici uniquement les segments appartenant à une période donnée, et toutes les définitions associées aux segments doivent être interprétées en conséquence.

Les routes débutent à une base spécifiée b, $b \in B$, et ne revisitent pas leur base avant qu'elles soient complétées. L'ensemble R reçoit les routes après leur génération.

L'ensemble des segments, S, est trié selon l'origine (O_i), le temps de départ (t_i^p) et la destination (D_i) des segments $i \in S$; d_i^p indique la durée de parcours du segment. L'ensemble des métasegments, Σ, est trié selon l'origine (O_s) et la durée du parcours (d_s^p) du métasegment $s \in \Sigma$. Définissons la notation. Soit:

R^+	:	l'ensemble de routes noncomplétées;
$S[k]$	:	le k-ième élément de S;
$\|S\|$	:	la cardinalité de S;
S_b	:	l'ensemble des segments débutant à la base b, $S_b \subseteq S$;
$S_b[k]$	:	le k-ième élément de S_b;
$\|S_b\|$	:	la cardinalité de S_b;
β	:	l'amplitude maximale d'arrêt;
α	:	la période de chevauchement.

Considérons le j-ième noeud dans la composition, κ_r, d'une route r, $r \in R$, ou d'une route incomplète r, $r \in R^+$. Nous avons alors:

n_j	:	le noeud correspondant à j; $n_j \in N$;
t_j^a	:	le temps d'arrivée au noeud n_j par la route r;
d_j^l	:	la durée totale depuis la base de la route, b_r, jusqu'au noeud n_j;
κ_j	:	la suite de segments utilisés pour se rendre de la base b_r jusqu'au noeud n_j;
seg_j	:	le segment, $seg_j \in S$, actuellement considéré et dont l'origine est le noeud n_j;
$mseg_j$	:	le métasegment, $mseg_j \in \Sigma$, actuellement considéré et dont l'origine est le noeud n_j;

u_j : le nombre de segments utilisant un "nu" qui originent au noeud n_j et qui donnent lieu à au moins une route admissible;

$$\nu_j = \begin{cases} V & \text{si le segment utilisé pour se rendre à } n_j \text{ utilise un "nu"} \\ F & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\rho_j = \begin{cases} V & \text{s'il est possible de terminer au moins une route à partir de } n_j \\ F & \text{sinon} \end{cases}$$

Alors, pour un jour donné et pour une base $b \in B$ spécifiée, la procédure de génération des routes-horaires normales s'énonce comme suit:

Etape 1. [Initialisation]

- $R = R^+ = \emptyset$;
- $k = 0$.

Etape 2.

- $k = k + 1$;
- Si $k > | S_b |$ STOP.
- $i = S_b[k]$.

Etape 3. [Traitement du segment i originant à la base b]

- $j = 1$;
- $n_j = D_i$; $t_j^a = t_i^s + d_i^p$; $d_j^l = d_i^p$; $\kappa_j = \{i\}$;
- $\nu_j = F$; $u_j = 0$; $\rho_j = F$; $seg_j = 0$.

Etape 4. [Début de la recherche des successeurs admissibles (durée de l'arrêt) de n_j]

- $S_j = \{ i \in S \mid O_i = n_j \text{ et } t_j^a - \alpha \leq t_i^s \leq t_j^a + \beta \}$;
- Si $S_j = \emptyset$ aller à l'étape 11;
- $seg_j = i = S_j[1]$.

Etape 5. [Test d'admissibilité (durée totale de la route) du segment i]

- $D = d_i^p + Max\ \{\ d_{n_j}^n\ ,\ t_i^s - t_j^a\ \}$;
- Si $D + d_j^t > t^o$ aller à l'étape 8.

Etape 6. [Traitement du segment i originant au noeud n_j]

- $l = j + 1$;
- $n_l = D_i$; $t_l^a = t_i^s + D$; $d_l^t = d_j^t + D$; $\kappa_l = \kappa_j \cup \{i\}$;
- $\nu_l = F$; $u_l = 0$; $\rho_l = F$; $seg_l = 0$;
- Si $D_i = b$ aller à l'étape 7; [route admissible trouvée]
- $j = l$;
- Retour à l'étape 4.

Etape 7. [Traitement d'une route; la route est définie par la suite de segments dans κ_l]

- $\rho_j = V$;
- $\kappa_r = \kappa_l$;
- $R = R \cup \{r\}$.

Etape 8.

- $i = seg_j + 1$;
- Si $i \notin S_j$ aller à l'étape 9;
- $seg_j = i$;
- Aller à l'étape 5.

Etape 9.

- Si $\rho_j = F$ aller à l'étape 11.

Etape 10. [Fin du traitement des segments originant à n_j (''backtracking'')]

- $l = j - 1$;
- Si $l = 0$ aller à l'étape 2;
- Si $\rho_j = V$ alors $\rho_l = V$ [$\rho_l \leftarrow \rho_l$ ou ρ_j]
- Si $\rho_j = V$ et $\nu_j = V$ alors $u_l = u_l + 1$;
- $j = l$;
- Si $\nu_{j+1} = V$ aller à l'étape 15, sinon aller à l'étape 8.

Etape 11. [Début traitement des nus originant à n_j]

- Si $v_j = V$ aller à l'étape 17; [on interdit l'utilisation de deux nus successifs]
- Soit $\Sigma_j = \{ s \in \Sigma \mid O_s = n_j \}$;
- $mseg_j = s = \Sigma_j[1]$.

Etape 12. [Test d'admissibilité (nombre de nus et durée totale) du métasegment s]

- Si $u_j > U$ aller à l'étape 10;
- Si $d_s^p + d_j^t > t^o$ aller à l'étape 16.

Etape 13. [Traitement d'un nu empruntant le métasegment s]

- $l = j + 1$;
- $n_l = D_s$; $t_l^a = t_s + d_s^p$; $d_l^t = d_j^t + d_s^p$; $\kappa_l = \kappa_j \cup \{s\}$;
- $v_l = V$; $u_l = 0$; $\rho_l = F$; $mseg_l = 0$;
- Si $D_s = b$ aller à l'étape 14; [route admissible trouvée]
- $j = l$;
- Aller à l'étape 4.

Etape 14. [Traitement d'une route (identique à l'étape 7)]

- $\rho_j = V$;
- $\kappa_r = \kappa_j$;
- $R = R \cup \{r\}$.

Etape 15.

- $s = mseg_j + 1$;
- Si $s \notin \Sigma_j$ aller à l'étape 16;
- $mseg_j = s$;
- Aller à l'étape 12.

Etape 16.

- Si $\rho_j = F$ aller à l'étape 17;
- Sinon aller à l'étape 10. [backtracking]

Etape 17. [Traitement d'une route incomplète]

- Soit $\bar{s}$ le dernier segment de κ_j. Si ce segment utilise un nu, alors $\kappa_j = \kappa_j - \{ \bar{s} \}$;
- $\kappa_r = \kappa_j$;
- $R^+ = R^+ \cup \{r\}$;
- Retour à l'étape 10.

ANNEXE D

GESTION EFFICIENTE DES DEPLACEMENTS D'EQUIPEMENT DE L'ENTREPRISE DE TRANSPORT ROUTIER DES MARCHANDISES EN LOTS BRISES

RAPPORT FINAL

Teodor Gabriel Crainic

Responsable administratif

Action concertée sur le transport des marchandises

Fonds F.C.A.R.

Ministère des transports du Québec

1985 – 1988

RESUME

Ceci constitue la partie *rapport de synthèse* du rapport final pour la subvention (numéro 86-TM-0017) que nous avons obtenue dans le cadre de *l'Action concertée sur le transport des marchandises*, offerte conjointement par le fonds F.C.A.R. et le ministère des Transports du Québec, pour la période 1985-1988.

Le rapport comporte quatre parties. La première (cette annexe) rappelle les objectifs du projet, en retrace l'historique et présente les principales réalisations, conclusions et perspectives découlant des travaux de recherche effectués dans le cadre du projet. A la fin de cette partie, nous avons placé la liste de tous les rapports de recherche, articles et communications reliés au projet.

Les trois parties suivantes se penchent plus particulièrement sur des réalisations majeures du projet. La partie II (le présent rapport) est dédié au problème de l'établissement de l'ensemble optimal de routes–horaires pour les chauffeurs et les tracteurs de l'entreprise de camionnage de charges partielles. La troisième partie (publication #495F) examine le cas de la localisation des dépôts d'équipement et du repositionnement de l'équipement vide. Enfin, la partie IV (publication #554) décrit un ensemble de fonctions graphiques, particulièrement orientées vers l'écriture d'interfaces interactive-graphiques pour les logiciels traitant des problèmes de transport. Mentionnons que tous les rapports et articles sont disponibles, sur demande, auprès du responsable administratif.

Nous incluons cette partie du rapport final comme annexe du présent rapport, à cause principalement de la lumière qu'elle peut jeter sur le contexte dans lequel le projet s'est déroulé et à cause de l'impact que le programme des actions concertés sur le transport de marchandises, du fonds F.C.A.R. et du ministère des Transports, a sur nos recherches concernant le camionnage au Québec.

L'EQUIPE ET COLLABORATION AVEC L'INDUSTRIE

Les chercheurs principaux, qui forment le noyau de l'équipe de recherche de ce projet, sont:

- Teodor Gabriel Crainic
  Centre de recherche sur les transports
  Université de Montréal
  et
  Département des Sciences administratives
  Université du Québec à Montréal

- Louis Delorme
  Centre de recherche sur les transports
  Université de Montréal

- Jacques Roy
  Département des Sciences administratives
  Université du Québec à Montréal

Monsieur Pierre Dejax, professeur de génie industriel à l'Ecole Centrale de Paris et directeur du Laboratoire Economique, Industriel et Social de la même Ecole, a aussi participé à la partie des travaux concernant la gestion des mouvements à vide.

Plusieurs étudiants ont réalisé leurs projets de recherche de maîtrise dans le cadre de ce projet, sous la supervision des chercheurs principaux:

- Jacques Hodgson (M. Sc. 1988)
  Département d'informatique et recherche opérationnelle
  Université de Montréal

- Alain Blanchette (M.B.A. – recherche 1989)
  Département des sciences administratives
  Université du Québec à Montréal

- Jean-François Mondou (M. Sc. 1989)
  Département d'informatique et recherche opérationnelle
  Université de Montréal

- Nicole Tétreault (M. Sc. 1989)
  Département d'informatique et recherche opérationnelle
  Université de Montréal

- Fouad Grar (M. Sc.)
  Département d'informatique et recherche opérationnelle
  Université de Montréal

Sylvie Couture et Lucie Bibeau ont participé comme analystes-programmeures aux travaux du projet et leur contribution s'est avérée essentielle à la concrétisation des méthodes que avons développées. Nous tenons à les en remercier publiquement.

Une aide appréciable, et appréciée, a été apportée, tant à la conception qu'à la réalisation du projet, par le personnel de l'entreprise de camionnage québécoise qui a collaboré au projet. Nous tenons à mentionner Monsieur Serge Durocher qui, lorsqu'il était vice-président de Brazeau Transport Inc., nous a assisté lors de la conception initiale du projet et, plus particulièrement, Monsieur Christian Martel, directeur exploitation (longue distance) dans la même entreprise et ensuite, chez Cabano Expeditex, lorsque celle-ci intégra Brazeau Transport.

La collaboration de Monsieur Martel fut précieuse à plusieurs égards. Il nous a aidé, lors des premières phases du projet, à bien le cibler, en nous permettant d'identifier et de définir correctement les problèmes de recherche intéressants pour l'entreprise (et pour l'industrie) et d'établir un calendrier réaliste de réalisation. Son assistance fut également précieuse lors des contacts avec le reste du personnel de l'entreprise et pour l'obtention des données et informations nécessaires à la spécification, à l'expérimentation et à la validation de nos modèles et méthodes.

Concernant la collaboration avec l'industrie, mentionnons qu'elle ne s'est pas toujours déroulée telle que prévue. Il faut souligner, cependant, que ce n'est pas par mauvaise volonté des deux parties, mais bien à cause des boulversements qu'a connus l'industrie du camionnage du Québec ces dernières années. Pendant le déroulement du projet, par exemple, l'entreprise avec laquelle nous collaborions a, tour-à-tour, acheté plusieurs compétiteurs, vendu certaines parties du réseau ainsi élargi et été achetée par une autre entreprise. Tout ceci ayant comme conséquences des modifications significatives dans le réseau et les politiques d'opération de l'entreprise et, encore plus important, une disponibilité limitée du personnel de l'entreprise pour la collaboration.

Nous estimons toutefois que le projet et la collaboration ont connu un franc succès et que l'expérience mérite d'être reprise. Il est par ailleurs évident que, à cause de la taille des entreprises de camionnage du Québec et de leur faible niveau d'intégration de l'informatique et de méthodes avancées de planification et de gestion, l'intervention du ministère des

Transports est nécessaire pour assurer une collaboration fructueuse entre les chercheurs universitaires et l'industrie.

OBJECTIFS ET DEROULEMENT DU PROJET

Le projet de recherche faisant l'objet de cette action concertée avait pour but l'amélioration des performances de l'industrie du camionage de charges partielles, en augmentant l'efficience de la gestion à court terme de l'utilisation de la flotte et des déplacements longue distance d'équipement. En particulier, il faut déterminer comment, à partir du plan tactique du transport, répondre adéquatement à la demande, tout en utilisant efficacement l'équipement et surtout, en gérant de façon efficace les mouvements à vide nécessaires afin d'amoindrir les conséquences du déséquilibre de la demande dans le réseau.

Le but devrait être atteint par la création d'outils simples et efficaces de planification des opérations et par leur intégration dans des entreprises de camionnage du Québec. Les outils feraient appel à des techniques de recherche opérationnelle pour la partie méthodologique, à des procédures informatiques de traitement de l'information et à des interfaces interactive-graphiques, tant pour la représentation des données et résultats, que pour l'intégration du planificateur au processus de traitement et optimisation.

Plusieurs discussions avec les personnes compétentes dans l'entreprise nous ont permis de dégager les points suivants:

(i) Le problème des déplacements à vide des remorques et tracteurs, afin de rééquilibrer le réseau et faire face à la demande, est de première importance pour l'entreprise et doit être considéré à tous les niveaux d'analyse.

(ii) Une partie importante de la demande est prévisible et ''sûre''. Les déplacements correspondant à cette demande sont assurés, en majorité, par des chauffeurs syndiqués qui effectuent des routes–horaires régulières (les ''bids''). L'établissement de ces routes est un processus important pour l'entreprise, la qualité des routes ayant un impact direct et significatif sur ses performances.

(iii) L'ajustement des fréquences et des heures de départ des remorques, ainsi que l'équilibrage final du réseau (les déplacements de vides), se fait quotidiennement lors

de la répartition (''dispatching''). La répartition constitue donc une autre des activités très importantes pour la bonne marche de l'entreprise.

(iv) Des systèmes d'aide à la gestion de l'information et à la prise de décision pourraient effectivement apporter une aide précieuse lors de la résolution des problèmes évoqués aux points (ii) et (iii).

(v) Le problème de l'établissement des routes régulières devrait cependant être attaqué en premier, étant donné son impact à long terme sur les performances de l'entreprise (si résolu manuellement, les routes ne sont refaites qu'une ou deux fois par année, en modifiant marginalement le dernier ensemble disponible). En particulier, ces routes constituent une des données du processus de répartition.

(vi) Lorsque le problème de la répartition est étudié, on doit y inclure l'examen de l'impact que peuvent avoir les nouveaux équipements de communication mobile entre les camions de cueillette et le répartiteur, sur les décisions concernant les départs des remorques pour les déplacements interurbains.

(vii) La planification des opérations sur les plateformes de chargement et de déchargement est un problème connexe, qui devrait faire aussi l'objet de recherches.

(viii) Des interfaces interactives-graphiques sont importantes, à la fois pour rendre accessible à l'utilisateur les techniques de recherche opérationnelle nécessaires pour résoudre le problème, et pour permettre à celui-ci d'intégrer au processus de résolution son expérience et les critères particuliers qui ne se modélisent pas.

Conséquemment, il fut décidé de se consacrer d'abord au problème de l'établissement des routes régulières. Parallèlement, nous allions examiner le problème des mouvements à vide et les questions reliées à la mise au point d'interfaces interactive-graphiques. Les problèmes concernant la répartition des mouvements longue distance devaient faire l'objet d'une phase ultérieure du projet.

Le projet a été complété avec succès, tous les objectifs ayant été atteints. La section des références à la fin de cette partie témoigne à la fois de la richesse des résultats obtenus, de l'intégration des étudiants aux travaux de l'équipe et de la large diffusion des résultats obtenus.

Il faut aussi mentionner que du financement supplémentaire a été disponible pour le projet. Il est principalement venu des subventions pour dépenses courantes du C.R.S.N.G. des chercheurs principaux et d'une subvention spéciale de la Fondation de l'Université du Québec à Montréal. Le financement additionnel a surtout été utilisé dans les aspects du projet traitant des problèmes de mouvements à vide pour équilibrer le réseau et de la mise au point d'interfaces interactives-graphiques, et a été rendu possible par l'intérêt que ces recherches ont pour d'autres applications et projets de recherche.

Dans la prochaine section, nous présentons un bref aperçu des principales réalisations du projet. Des présentations détaillées de ces sujets constituent les autres parties de ce rapport. D'autres détails et précisions peuvent être obtenus en consultant les références indiquées à la fin de cette partie.

PRINCIPALES REALISATIONS, RETOMBEES ET PERSPECTIVES

Nous allons traiter séquentiellement les trois principaux aspects du projet de recherche: gestion des déplacements des vides, graphisme et routes–horaires régulières.

Gestion des vides

Nous avons débuté en faisant une revue de l'état de l'art concernant les problèmes, modèles et approches de résolution pour la prévision et la gestion des mouvements à vide des véhicules pour le transport des marchandises (Crainic et Dejax, 1986; Dejax et Crainic, 1987). Celle-ci a reçu un très bon accueil de la part de la communauté scientifique et a été publiée dans la revue **Transportation Science**.

Outre la classification et l'évaluation relative des modèles et méthodes examinés, ce travail a permis de dégager un nombre de conclusions, dont les plus importantes dans le cas présent sont:

(i) Il est préférable de traiter le problème des mouvements à vide d'une façon globale, en le considérant à chacune des phases (stratégique, tactique et opérationnelle) du processus de planification des opérations de l'entreprise. Il peut ainsi y avoir une hiérarchie des décisions assurant que même au niveau local on tient compte des objectifs globaux de l'entreprise. D'autre part, l'échange continu d'informations est

aussi assuré.

(ii) En général, il est plus avantageux (en termes d'efficacité et performance globale) de traiter à la fois les mouvements pleins et les mouvements vides. Ceci est d'autant plus vrai que l'horizon de planification est court.

(iii) Pour la planification à très court terme (telle la répartition), l'utilisation de modèles d'optimisation de type stochastique et dynamique constitue la meilleure approche.

Notre approche se situe exactement dans le cadre défini par ces constatations. Nos méthodes et outils axés vers la planification tactique des opérations (Roy et Crainic, 1989; Roy et Delorme, 1989; Crainic et Roy, 1988; etc.) intègrent le traitement des mouvements à vide dans la planification globale des services, fréquences et déplacements de fret de l'entreprise. Ces même mouvements sont implicitement considérés lors de l'établissement des routes régulières et nous comptons utiliser la programmation stochastique et dynamique dans la phase du projet traitant des problèmes de répartition. Il nous restait à examiner le problème au niveau stratégique.

Nous avons donc entrepris l'étude du problème de la planification stratégique des déplacements à vide des véhicules afin de rééquilibrer le réseau. Plusieurs types de véhicules sont considérés lors de la modélisation. La localisation et l'utilisation des dépôts d'équipement sont également prises en compte.

L'étude des modèles pour le cas linéaire est complété (Dejax et Crainic, 1986; Crainic, Dejax et Delorme, 1986a, 1986b, 1987 et 1989). Ces modèles, voir aussi la partie III, ont une structure de problèmes de programmation linéaire mixte qui rappelle celle des modèles de localisation simple à deux niveaux.

La présence des mouvements bidirectionnels entre les dépôts et les clients et celle des mouvements inter-dépôts, requis pour équilibrer le réseau, assure toutefois qu'il s'agit d'une classe originale de modèles, pour laquelle des algorithmes propres peuvent être développés.

En particulier, l'étude des propriétés des modèles (voir la partie III pour les détails) a révélé une structure de réseau qui apparait non seulement dans la formulation initiale, mais aussi dans toutes les relaxations ou restrictions que nous pouvons en déduire.

Nous avons entrepris la recherche et la mise au point d'algorithmes efficaces pour cette classe de problèmes. Nous avons complété le développement d'algorithmes basés sur des principes d'énumération implicite (Hodgson, 1988; Crainic, Delorme et Dejax, 1987) et de dualité (Fouad, 1989; Delorme, Crainic et Dejax, 1988). Nous complétons actuellement les recherches reliées à des approches de restriction basées sur des méthodes primales-duales (Tétreault, 1989; Tétreault, Delorme et Crainic, 1989).

La comparaison de ces méthodes révèle qu'une approche des plus efficaces pour résoudre le problème linéaire consiste à réunir dans une structure de "branch-and-bound", la borne inférieure obtenue par l'approche duale et la borne supérieure calculée à l'aide de la méthode de restriction (Crainic, Delorme et Dejax, 1988; Delorme, Crainic et Dejax, 1989). Par ailleurs, il semble que cette dernière approche fournit une excellente approximation de la solution optimale (nous obtenons souvent la solution optimale). De plus, les solutions qu'elle offre sont souvent entières. Nous continuons les recherches à ce sujet.

Les travaux accomplis dans le cadre de ce volet du projet ont une importance qui dépasse le simple cadre du projet. Sur le plan théorique d'abord, il s'agit d'une nouvelle classe de problèmes et la recherche des propriétés et algorithmes efficaces correspondant constitue un apport significatif à l'avancement des connaissances. Dans cet ordre d'idées, nous voulons d'ailleurs continuer les recherches afin d'investiguer d'autres avenues de développement algorithmique (telle la relaxation lagrangienne) ou de modélisation (l'introduction de coûts concaves dans la formulation est importante tant théoriquement, que d'un point de vue pratique). Quant à l'aspect pratique, nos résultats s'appliquent non seulement dans l'industrie du camionnage de charges partielles, mais aussi dans celle du transport de chargements complets et dans la gestion des flottes de wagons de chemin de fer et de containers.

Graphisme

Les études concernant la mise au point de systèmes interactifs-graphiques d'aide à la planification débordent le cadre strict du projet, à cause de leur ampleur, de leur application à plusieurs projets et de leurs exigences financières. Notons, toutefois, que tous les problèmes que nous traitons ont en commun une structure faisant appel aux *réseaux* et que, d'autre part, les logiciels que nous développons pour les traiter devraient contenir un noyau

méthodologique, des bases de données, et des procédures pour y accéder et les modifier, interactivement et graphiquement, lorsqu'approprié. Si le noyau méthodologique est différent, les deux autres parties présentent souvent des caractéristiques communes d'un logiciel à l'autre (Crainic et Mondou, 1986a et 1986b; Mondou, Crainic et Couture, 1987; Crainic et Dejax, 1987; Crainic et Roy, 1988; Roy et Crainic, 1989; Mondou, 1989; Crainic et Dejax, 1989).

Après étude des besoins de nos logiciels potentiels et de l'équipement et compilateurs existants, nous sommes arrivés à la conclusion que le language C était le plus adéquat pour l'écriture de nos systèmes, ceci afin de pouvoir développer des systèmes qui puissent traiter, efficacement et en utilisant des micro-ordinateurs, le volume et la complexité des données propres au transport des marchandises. La souplesse et l'efficacité de la manipulation des données offertes par le langage C ont été la raison déterminante de notre choix.

Suite à ce choix, nous avons écrit une bibliothèque de fonctions graphiques, en langage C, particulièrement bien adaptée au graphisme de réseau. Ces fonctions offrent un noyau solide pour la mise au point de sytèmes interactifs-graphiques pour les problèmes de transport et distribution des marchandises, tant pour la planification que pour la formation et l'entraînement des gestionnaires. La partie IV présente la description et le manuel d'utilisation de ces fonctions.

Routes régulières

Une partie importante des travaux du projet a été consacrée à l'étude du problème de l'établissement de l'ensemble optimal de routes régulières (Crainic, Roy et Delorme, 1987, 1988a, 1988b, 1988c; Crainic, Delorme et Roy, 1989; Crainic, 1989; Blanchette, 1989).

Les entreprises de camionnage ont souvent recours à l'utilisation de routes–horaires régulières pour satisfaire la partie stable (représentant de 60% à 80% de la demande totale, selon les saisons) de la demande de transport intercité des marchandises. Ces transporteurs peuvent ainsi assurer à leur principaux clients un service fiable, tout en offrant à leurs chauffeurs la possibilité de choisir, parmi un ensemble de routes régulières, celles qui leur conviennent le mieux. Ce choix s'effectue, dans la plupart des cas, selon l'ancienneté des chauffeurs dans l'entreprise. L'utilisation de routes–horaires régulières permet aussi de mieux

contrôler et d'améliorer l'utilisation de l'équipement et facilite la répartition.

L'élaboration de telles routes–horaires suppose qu'on ait préalablement défini un plan de transport qui tient compte des compromis à respecter entre la satisfaction des niveaux de service offerts à la clientèle et la minimisation des coûts d'opération, et qui détermine les services, fréquences et itinéraires utilisés. Des routes–horaires régulières sont ensuite conçues de façon à ''couvrir'' les services prévus au plan de transport, tout en respectant les règles établies dans la convention collective de travail des chauffeurs et les lois régissant leur temps de travail. L'objectif est, dans ce cas, d'assurer la livraison à temps des marchandises au terminus de destination et de minimiser les coûts d'opération et le nombre de déplacements de remorques vides et de tracteurs sans remorque (les ''nus'').

La difficulté, néanmoins, consiste à élaborer des routes régulières efficaces. En effet, les coûts associés à différents ensembles de routes régulières varient en fonction:

(i) du degré d'utilisation des heures productives permises par les lois et la convention collective;

(ii) de la fréquence des temps d'arrêt pour changer de remorques, faire le plein et autres temps d'attente;

(iii) de l'utilisation du surtemps;

(iv) des frais auxiliaires tels que les frais d'hébergement, de repas, etc.

Devant l'ampleur du problème, les gestionnaires des entreprises de camionnage, qui doivent résoudre ces problèmes manuellement, se contentent généralement d'analyser un nombre restreint de combinaisons de routes possibles (souvent en modifiant l'ensemble de routes utilisé lors de la période précédente de planification), se fiant à leur expérience pour obtenir un ensemble efficient de routes régulières. Or, cette approche s'avère insuffisante dans un contexte d'évolution rapide de l'industrie et, surtout, dans le cadre de la réglementation plus stricte, actuellement en vigueur, concernant la durée des périodes de conduite et de repos.

Notre approche vise justement à proposer un système informatique d'aide à la prise de décision en vue d'améliorer l'efficacité du processus de planification et la qualité des routes–horaires régulières utilisées par les entreprises de transport routier des marchandises.

Nous n'avons trouvé dans la littérature de spécialité aucune référence mentionnant des travaux portant sur ce sujet. Toutefois, l'analyse des caractéristiques du problème et les

comparaisons avec les problèmes d'établissement des horaires d'équipage pour les autres modes de transport, nous ont amené à conclure que le cas de la construction de routes–horaires régulières présente des similitudes importantes avec celui concernant les horaires des équipages d'avions.

Nous proposons donc une approche qui, à partir des services et fréquences spécifiés dans le plan de transport et des règles et conventions de légalité (lois, convention collective, etc.), traite le problème à travers trois modules:

(i) génération d'un ensemble de "bonnes" routes;

(ii) sélection de l'ensemble "optimal" de routes couvrant tous les services considérés;

(iii) affectation des horaires.

La description détaillée de cette approche, de l'expérimentation et des résultats de son application à des données réelles se trouve à la partie II. Ici, nous ne présentons que les grandes lignes de nos travaux.

Nous avons mis au point des procédures de chaînage pour la génération des routes, qui en assurent la légalité. Des critères de coût, productivité ou coût marginal peuvent être utilisés pour tamiser les routes générées. Il est important de noter que nous assignons à chaque route, outre son coût réel pour la compagnie, un coût relié à sa productivité, c.-à.-d. mesurant la partie du temps payé qui est effectivement dédié à la conduite. Cette mesure permet une meilleure discrimination des routes, étant donné la structure des coûts dans le L.T.L. où les chauffeurs sont assurés d'un revenu minimum par jour travaillé.

Nous avons développé une formulation de *recouvrement d'ensembles*, modélisation classique pour les problèmes d'horaires. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé une méthode de relaxation et de décomposition, combinée avec une méthode de génération progressive de colonnes. Cette approche méthodologique s'est révélée très efficace.

Quant à la qualité des solutions obtenues, les conclusions des comparaisons entre nos résultats et les routes utilisées par l'entreprise sont extrêmement encourageantes. Nous observons, en particulier, que l'application de la méthodologie que nous proposons a entraîné une recherche de routes plus productives, plus efficaces et utilisant mieux le temps disponible dans une période de travail.

Cette recherche de l'efficacité se traduit par des gains appréciables dans plusieurs mesures de productivité. Nous remarquons particulièrement la diminution marquée du ''coût'' de productivité, ce qui se traduit par des diminutions sensibles du nombre de routes–horaires, et donc du nombre de chauffeurs requis.

Notons, par ailleurs, que tout gain de productivité obtenu au niveau des routes–horaires régulières, entraîne aussi des améliorations dans l'utilisation du matériel, surtout les tracteurs, contribuant ainsi à une meilleure performance des opérations de l'entreprise. Donc, les gains importants de productivité déjà obtenus par l'intermédiaire des solutions actuelles, soulignent l'intérêt de celles-ci et démontrent le succès de l'approche que nous proposons.

Il est important de noter que nous avons prévu la possibilité de l'interaction de l'usager avec chacun des modules composant le système, ceci à la fois pour diriger les processus, pour faciliter les choix finaux et pour permettre à l'usager d'imposer ses critères et ses préférences. Cet aspect de l'approche est très important, étant donné le grand nombre de routes possibles et de règles, critères et réglements qui ne peuvent pas tous être incorporés dans un modèle quantitatif. Cette interaction devrait être assurée par la mise au point de systèmes interactifs-graphiques incorporant les modèles et procédures dévéloppés, ce qui constitue la suite logique de ces travaux.

CONCLUSIONS

Le projet a été complété avec beaucoup de succès. Ses retombés sont nombreuses, tant du point de vue théorique que de celui des applications, immédiates et potentielles. La diffusion des résultats des travaux entrepris dans le cadre du projet a été, et continue d'être, assurée à travers tous les moyens à la disposition des chercheurs et un nombre significatif d'étudiants de deuxième cycle ont participé au projet. La collaboration avec l'industrie s'est aussi bien déroulée, en dépit des bouleversements que connaît l'industrie du camionnage en général et l'entreprise partenaire en particulier. Une équipe de recherche reconnue et des compétences certaines ont été ainsi établies.

Il est donc légitime d'affirmer que, dans notre cas du moins, l'action concertée a plus qu'adéquatement rempli son rôle et atteint son but. La continuation du projet était d'ailleurs prévue, suite à ce succès et conformément aux objectifs de l'action concertée. A ce propos, il

est regrettable que, dans le volet de cette année du programme, on ait jugé bon de changer radicalement les objectifs et de revenir sur le but de continuation des efforts entrepris et de consolidation des équipes et des compétences.

Nous espérons toutefois que le sérieux de nos travaux et la signification de nos résultats seront reconnus et qu'éventuellement nous pourrons continuer nos efforts de recherche et développement dans le domaine du camionnage au Québec.

REFERENCES

Blanchette, Alain (M.B.A. – recherche 1989), *Problèmes d'établissement des routes–horaires dans le transport des marchandises par camion*, département des Sciences administratives, Université du Québec à Montréal; Codirection T.G. Crainic et J. Roy.

Crainic T.G. (1989), *Crew Scheduling in Less-Than-Truckload (LTL) Transportation*, **CORS Scheduling Workshop**, University of Toronto, Toronto, 16 juin, (conférence sur invitation).

Crainic T.G. et Dejax P.J. (1989), *Freight Distribution and Transportation Systems Planning*, **International Journal of Physical Distribution & Materials Management**, 19(1), 3-12.

Crainic T.G. et Dejax P.J. (1987), *Interactive-Graphic and O.R. Methodologies for Freight Distribution and Transportation Planning*, **11th Triennial Conference on Operations Research**, IFORS, Buenos Aires, Argentine, 10-14 août.

Crainic T.G. et Dejax P.J. (1986), *A State-of-the-art Survey of Empty Vehicle/Container Freight Transportation Problems and New Research Directions*, **8th European Congress on Operational Research**, Lisbonne, Portugal, 16-19 septembre.

Crainic T.G. et Mondou J.-F. (1986a), *Système interactif-graphique pour la planification des réseaux de transport des marchandises*, Publication #467, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

Crainic T.G. et Mondou J.-F. (1986b), *An Interactive Graphic Planning System for Freight Transportation Networks*, **ORSA/TIMS Joint National Meeting**, Miami, 27-29 octobre.

Crainic T.G. et Roy J. (1989), *Planification des opérations de l'entreprise de camionnage en charges partielles (LTL)*, **L'innovation par la collaboration entreprises-chercheurs en transport routier des marchandises**, Association québécoise du transport et des routes, Montréal, 31 janvier, (communication sur invitation).

Crainic T.G. et Roy J. (1988), *O.R. Tools for Tactical Freight Transportation Planning*, **European Journal of Operations Research** 33 (3), 290-297.

Crainic T.G., Dejax P.J. et Delorme L. (1989), *Models for Multimode Multicommodity Location Problems with Interdepot Balancing Requirements*, **Annals of Operations Research** 18, 279-302.

Crainic T.G., Dejax P.J. et Delorme L. (1987), *Models for Multimode Multicommodity Location Problems with Interdepot Balancing Requirements*, **ISOLDE IV - International Symposium on Locational Decisions**, Namur, Belgique, 11-16 juin.

Crainic T.G., Dejax P.J. et Delorme L. (1986a), *Problèmes de localisation-distribution avec équilibrage: éléments de modélisation et propriétés*, Publication #495F, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

Crainic T.G., Dejax P.J. et Delorme L. (1986b), *Problèmes de localisation de dépôts avec équilibrage interdépots* **Première journée Franco-Québécoise sur la logistique et les transports**, Ecole Centrale, Paris, 18 décembre, (communication sur invitation).

Crainic T.G., Delorme L. et Dejax P.J. (1988), *Algorithms for Location/Distribution Problems with Balancing Requirements*, congrès conjoint **TIMS XXVIII/EURO IX**, Paris, 6-8 juillet, (communication sur invitation).

Crainic T.G., Delorme L. et Dejax P.J. (1987), *A Branch-and-Bound Approach for Location/Distribution Problems with Balancing Requirements*, **ORSA/TIMS Joint National Meeting**, New Orleans, 4-6 mai.

Crainic T.G., Delorme L. et Roy, J. (1989), *Design of Driver Routes for the LTL Freight Transportation*, **CORS/TIMS/ORSA Joint National Meeting**, Vancouver, 8-10 mai, (conférence sur invitation).

Crainic T.G., Roy J. et Delorme L. (1988a), *Etablissement des routes-horaires (bids) pour le camionnage de lots brisés*, **23e Congrès annuel de l'Association québécoise du transport et des routes,** Montréal, 22-25 mars, (communication sur invitation).

Crainic T.G., Roy J. et Delorme L. (1988b), *Design of Driver Routes in the LTL Motor Carrier Industry*, congrès conjoint **TIMS XXVIII/EURO IX**, Paris, 6-8 juillet, (communication sur invitation).

Crainic T.G., Roy J. et Delorme L. (1988c), *Crew Scheduling for LTL Carriers*, **Recent Progress in Transportation Research in Italy and Canada - An International Seminar,** Montréal, Canada, 26-30 septembre, (conférence sur invitation).

Crainic T.G., Roy J. et Delorme L. (1987), *Gestion efficiente des déplacements d'équipages dans l'entreprise de transport routier des marchandises en lots brisés*, **Symposium Recherche et Développement**, Association québécoise des transports et des routes, Montréal, 26 novembre .

Dejax P.J. et Crainic T.G. (1987), *A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation*, **Transportation Science** 21(4), 227-247.

Dejax P.J. et Crainic T.G. (1986), *Gestion des flottes de véhicules et logistique des mouvements à vide dans le transport des marchandises*, **Première journée Franco-Québécoise sur la logistique et les transports**, Ecole Centrale, Paris, 18 décembre, (communication sur invitation).

Delorme L., Crainic T.G. et Dejax P.(1989), *Solving Multicommodity Location/Distribution Problems with Balancing Requirements*, **CORS/TIMS/ORSA Joint National Meeting**, Vancouver, 8-10 mai, (conférence sur invitation).

Delorme L., Crainic T.G. et Dejax P.J. (1988), *Dual Methods for Location/Distribution Problems with Balancing Requirements*, **ORSA/TIMS Joint National Meeting**, Washington, 26-27 avril.

Grar, Fouad (M.Sc.; dépôt prévu hiver 1989), *Méthodes duales pour les problèmes de localisation - distribution de dépôts d'équipement avec rééquilibrage inter-dépôt*, département d'Informatique et recherche opérationnelle, Université de Montréal. Direction T.G. Crainic.

Hodgson, Jacques Jr. (M.Sc. 1988), *Application d'une méthode de "branch-and-bound" au problème de localisation avec transferts entre les dépôts*, département d'Informatique et

recherche opérationnelle, Université de Montréal.

Mondou, Jean-François (M.Sc. 1989), *Mise au point d'un système interactif-graphique pour la planification tactique du transport des marchandises*, département d'Informatique et recherche opérationnelle, Université de Montréal. Direction T.G. Crainic.

Mondou J.-F. et Crainic T.G. (1988), *Conception d'un logiciel interactif-graphique pour la planification tactique du transport des marchandises*, **Journées de l'optimisation 1988**, Université de Montréal, 2-4 mai, (communication sur invitation).

Mondou J.-F., Crainic T.C. et Couture S. (1987), *BGC: bibliothèque de fonctions graphiques en langage C*, Publication #554, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

Roy, J. et Crainic T.G. (1989), *Des outils d'analyse de réseaux de transport et de distribution physique des marchandises*, **Gestion efficace de la distribution physique**, l'Association canadienne de gestion de la logistique et la Société canadienne de génie industriel, Montréal, 1er mars, (conférence sur invitation).

Roy J. et Delorme L. (1989), *NETPLAN: A Network Optimization Model for Tactical Planning in the Less-than-Truckload Motor-Carrier Industry*, **INFOR** 27 (1), 22-35.

Tétreault, Nicole (M.Sc. 1989), *Une approche de restriction basée sur méthode primale-duale pour le problème de localisation - distribution avec échanges inter-dépôts*, département d'Informatique et recherche opérationnelle, Université de Montréal. Direction T.G. Crainic.

Tétreault N., Delorme L. et Crainic T.G. (1989), *Primal-Dual Methods for Location Problems with Balancing Requirements*, **CORS/TIMS/ORSA Joint National Meeting**, Vancouver, 8-10 mai.